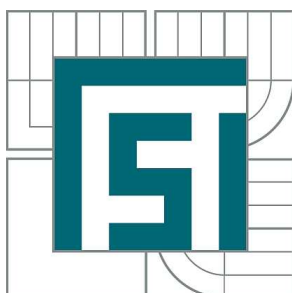


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## **NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO REAKTORU PRO VÝZKUM SPALOVÁNÍ BIOMASY V PEVNÉM LOŽI**

DESIGN OF AN EXPERIMENTAL FIXED-BED REACTOR FOR BIOMASS COMBUSTION  
RESEARCH

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. PAVEL KUBISZ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. VÍT KERMES, Ph.D.**

BRNO 2010



## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce experimentálního reaktoru pro výzkum spalování biomasy v pevném loži. Toto zařízení má za cíl umožnit dobrou regulovatelnost spalovacího procesu a sběr kvalitních dat, zejména teplot, tlaků, složení plynů a hmotnostních úbytků. Získané data následně poslouží pro tvorbu matematických modelů spalování biomasy v pevném loži.

**Klíčová slova:** Biomasa, roštové spalování, měření, konstrukční návrh

## Abstract:

Diploma thesis deals with constructional design of an experimental fixed-bed reactor for biomass combustion research. This device is designed to facilitate good control of the combustion process and collection of quality data, particularly temperature, pressure, gas composition and mass loss. Obtained data is for creating mathematical models of combustion of solid biomass in the fixed-bed.

**Keywords:** Biomass fuel, fixed-bed combustion, measuring, constructional design

## Bibliografická citace

KUBISZ, P. *Návrh experimentálního reaktoru pro výzkum spalování biomasy v pevném loži*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vít Kermes, Ph.D.



## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou Diplomovou práci na téma "Návrh experimentálního reaktoru pro výzkum spalování biomasy v pevném loži" jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Víta Kermese, Ph.D. a v seznamu použité literatury uvedl všechny zdroje a podklady, ze kterých jsem čerpal.

V Brně dne :

.....



## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Vítovi Kermesovi, Ph.D za odborné vedení mé práce, podnětné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.





---

## Obsah

1	Úvod.....	12
2	Mechanismus spalování tuhých paliv .....	13
2.1	Vysušování tuhého paliva .....	13
2.2	Zplynování tuhých paliv .....	14
2.3	Hoření pevných složek paliva a vytváření popela .....	15
2.4	Shrnutí.....	15
3	Metody spalování tuhých paliv .....	16
3.1	Spalování roštové.....	16
3.1.1	Topeniště s pevným roštem .....	17
3.1.2	Topeniště s mechanickým roštem.....	18
3.2	Spalování práškové .....	20
3.3	Spalování fluidní.....	21
4	Přehled experimentálních reaktorů na spalování biomasy .....	22
4.1	Obecné charakteristika.....	22
4.2	Zkonstruované reaktory .....	22
4.3	Závěrečné shrnutí experimentálních reaktoru.....	28
5	Návrh experimentálního reaktoru .....	30
5.1	Požadavky na experimentální reaktor .....	30
5.2	Koncepční návrh reaktoru.....	31
5.2.1	Předpoklady a spalovací podmínky .....	33
5.2.2	Hmotnostní omezení .....	34
5.2.3	Dimenzování zařízení .....	34
5.2.4	Zapalovací systém.....	41
5.2.5	Umístění a velikosti vizuálních otvorů .....	42
5.2.6	Přístup do reaktoru.....	42
5.3	Konstrukční řešení .....	43
5.3.1	Spalovací komora .....	44
5.3.2	Vodní uzávěr.....	48
5.3.3	Bezkontaktní napojení spalovací a dohořivací komory .....	50
5.3.4	Dohořivací komora .....	51
5.3.5	Rám zařízení .....	53
5.4	Výrobní postup problémových částí .....	54
5.5	Pracovní postup při montáži spalovací komory.....	55
5.6	Přibližná cenová kalkulace .....	56
5.7	Shrnutí.....	57
6	Závěr .....	58

---

# 1 Úvod

Celosvětový zájem o globální oteplování způsobené emisemi CO<sub>2</sub> a dalšími skleníkovými plyny, vede ke snaze o energetické a materiálové úspory. Materiálová a energetická spotřeba je navíc umocněna dramatickým růstem obyvatelstva. Matematické modely pojednávající o intenzitě růstu spotřeby energie ukazují, že do roku 2020 se zvýší spotřeba energie o 20% a do roku 2050 o 35% [11]. Většinu světových energetických nároků pokrývá energie z fosilních paliv. Ty jsou v mnohých případech jen těžko nahraditelné, ale jejich zdroje nejsou neomezené, proto je důležité hledat alternativní zdroje energie. Evropská Unie v dubnu 2009 vydala směrnici (2009/28/ES), kde si klade za cíl zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie k celkovým zdrojům energie na 20% do roku 2020 [12]. Mezi obnovitelné zdroje energie patří vodní, větrné, solární elektrárny a procesy využívající geotermální energie a spalující biomasu. Energie produkovaná z biomasy tvoří 10-14% světových energetických zdrojů. V řadě zemí ale není tato produkce, kvůli místní legislativě konkurenceschopná[11].

Nejrozšířenějším způsobem získávání energie z biomasy je její spalování. Proces spalování biopaliv se zkouší již několik let a je zde stále mnoho problémů, např. přeměna biomasy na palivo, dávkování paliva, tlaková ztráta spalovacího vzduchu průchodem přes lože, teploty spalování, produkované emise, hmotnostní úbytek paliva během hoření a v neposlední řadě nastavení stechiometrického množství vzduchu. Zjištění optimálních podmínek spalování daného druhu paliva, je nutností pro správné nastavení spalovacího systému. V mnoha případech se spalovací podmínky stanoví v závislosti na vypočtených hodnotách ze softwarových systémů, jako jsou např. CFD. Jsou to ovšem hodnoty teoretické a s realitou nemusí vždy korespondovat.

V této diplomové práci je kladeno za cíl vytvořit konstrukční a technologický návrh experimentálního zařízení, které bude schopné měřit fyzikální veličiny v průběhu spalovacího procesu. Zjištěné hodnoty následně poslouží jako porovnání s teoretickými hodnotami matematických modelů.

---

## 2 Mechanismus spalování tuhých paliv

V této kapitole bude popsáno spalování paliv z hlediska jejich druhu a velikostí částic. Zmíněné poznatky jsou základem pro návrh pecí a kotlů.

Vystavujeme-li tuhé palivo vysokým teplotám, prochází třemi základními fyzikálními změnami a to:

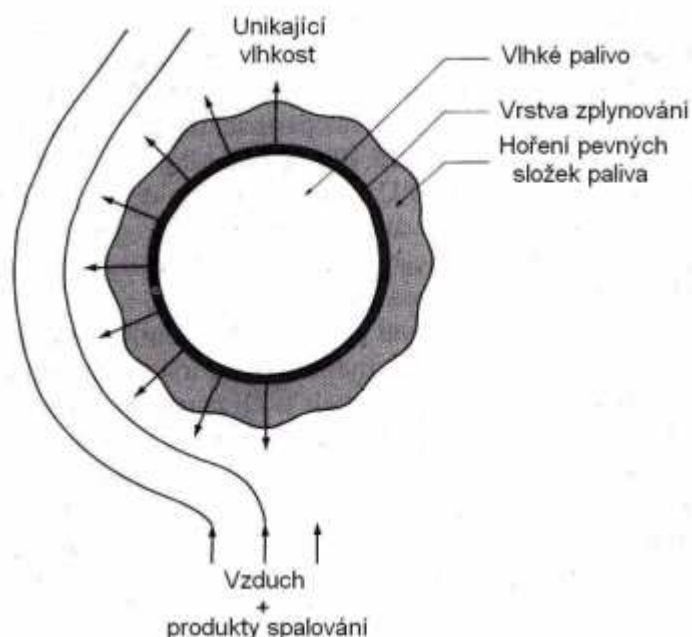
- vysušováním,
- zplynováním,
- hořením pevných složek paliva.

Význam jednotlivých změn v procesu spalování daného paliva lze odhadnout na základě palivového rozboru[1].

### 2.1 Vysušování tuhého paliva

Vlhkost v palivu existuje ve dvou základních formách – jako voda obsažená ve struktuře paliva nebo jako voda chemicky vázaná v palivu. Palivo je tím víc pórovitější, čím víc je schopné vázat vlhkost. Čerstvě vytěžené dřevo obsahuje asi 60% vlhkosti, dřevo proschlé dosahuje 20% vlhkosti. Lignit obsahuje více než 40% vody a černé uhlí, díky své nízké pórovitosti, dosahuje vlhkosti jen několika procent[1].

Vystavíme-li nadrcené částice dřeva v peci proudu vzduchu a působení tepelné energie, je vypařování vlhkosti v palivu urychleno oproti přirozenému vysušování. Energie potřebná na vysušení paliva se rovná přibližně výparnému teplu vody v množství jaké je obsažené v palivu, pak energii na zvýšení teploty daného množství vody a zahřátí paliva na danou teplotu. K této celkové energii je ještě potřeba připočítat energii potřebnou k vytvoření dostatečných teplotních gradientů v částici paliva. Tyto teplotní gradienty jsou hnací silou k překonání odporu průchodu vlhkosti přes zplynovací vrstvu. Zplynovací vrstva vzniká na povrchu částice velice brzo, ihned po vypaření povrchové vlhkosti a zahřátí částice na zápalnou teplotu. Po zplynovací vrstvě následuje hoření spalitelných složek paliva. Na obrázku 1 je popsán proces hoření na elementární částici paliva[1].



**Obrázek 1** Princip hoření částice paliva[1]

---

Z těchto poznatků vyplývá, že je výhodné spalovat paliva s nejmenším obsahem vázané vlhkosti. V praxi ale neexistuje palivo bez vázané vlhkosti, proto je důležité, aby částice paliv byly co nejmenší.

## **2.2 Zplynování tuhých paliv**

Je-li proces vysušování částice ukončen, zvýší se teplota, která zapříčiní rozklad paliva a uvolnění těkavých složek hořlaviny (tj. pyrolytické produkty). Těkavé složky vycházejí skrze póry částice, a proto okolní kyslík není schopný pronikat do středu částice. Tento stupeň zplynování je označován jako pyrolýza. Po zapálení pyrolytických produktů okolním plamenem, dochází k dalšímu zahřívání částice a tím i zrychlení celého procesu zplynování. Jestliže je v částici obsažena ještě nějaká vlhkost, dochází k jejímu vypařování a tím se teplota hoření snižuje. Až je z paliva odpařena veškerá vlhkost teplota hoření se zvýší [1].

Spalováním dřevěných paliv se pyrolýzy dosahuje při teplotách 225 – 375°C. Mezi pyrolytické produkty ve spalovacím prostředí můžeme zařadit uhlovodíky s krátkými řetězci, oxid uhelnatý, oxid uhlíčitý, vodík a vodní páru. Hořlavé složky těchto pyrolytických produktů dále hoří, pokud je v jejich blízkosti dostatečný plamen a přítomnost kyslíku [1].

Zapálení paliva může nastat buď zapálením vázaného uhlíku jeho na povrchu, nebo zapálením těkavých složek uvolňujících se z povrchu částice paliva. Druh mechanismu zapálení závisí na druhu a intenzitě přiváděné tepelné energie. Dodáváme-li palivu tepelnou energii pomocí intenzivní tepelné radiace, povrch paliva, a tím i povrchová vrstva vázaného uhlíku, se prudce zahřívá. Z paliva se nestačí uvolnit dostatečné množství těkavých složek a dojde k zapálení uhlíku na povrchu paliva. Pokud je palivu přivedená tepelná energie pomocí konvekce, vzniklé proudění zamezí dostatečné akumulaci hořlavých plynů a dojde také k zapálení uhlíku na povrchu částice. V případech, kdy je intenzita tepelné radiace menší, než je zápalná teplota uhlíku dojde nejprve k zapálení uvolněných hořlavých plynů [1].

Časová prodleva než dojde k zapálení paliva je závislá na velikosti jeho částic, tepelné vodivosti, rychlosti a intenzitě ohřevu. K zapálení paliv ve formě prachu dochází obvykle do několika milisekund, jakmile částice paliva dosahuje rozměru okolo 10mm, zapalování se prodlužuje na několik sekund. Pokud je teplota při zapalování jen nepatrně vyšší než je teplota vznícení paliva (tzn. malý tepelný gradient), doba k zapálení se prodlužuje. Vyšší obsah vlhkosti dobu zapálení paliva také prodlužuje [1].

---

## **2.3 Hoření pevných složek paliva a vytváření popela**

Poslední částí spalovacího procesu tuhých paliv je spálení pevných složek paliva. Po ukončeném procesu zplynování zůstávají zuhelnatělé částice paliva a popel. Zuhelnatělé částice paliva jsou velice porézní, dosahují až 90% pórovitosti. Ze zuhelnatělých částic už neunikají žádné plyny, a tudíž kyslík může difundovat do nitra zbylého paliva. Rychlost vyhořívání zbylých částic závisí jednak na rychlosti chemické reakce mezi uhlíkem a kyslíkem, ale také na schopnosti kyslíku difundovat do zuhelnatělých zbytků paliva. Na povrchu zuhelnatělých částic dochází primárně k reakcím tvořících oxid uhelnatý, který později podléhá dalším reakcím za vzniku oxidu uhličitého. Povrchové exotermní reakce zvyšují teplotu až na 100-200°C vzhledem ke spalovacímu plynu.

Rychlost hoření lze také ovlivnit koncentrací kyslíku ve spalovacím vzduchu, jeho teplotou, charakterem proudění a pórovitosti zuhelnatělých částic [1].

## **2.4 Shrnutí**

Částice pevných paliv ve spalovacím procesu podléhají třem základním fyzikálním změnám- sušením, zplynováním a hořením zuhelnatělých složek. Rychlost těchto procesů závisí na druhu paliva, obsahu vlhkosti, velikosti částic, teplotě spalování a přístupu kyslíku. U spalování malých částic dochází k vysušování, zplynování a hoření pevných složek paliva současně. Vysušování je v tomto případě nejrychlejším procesem. U velkých částic paliv, jako jsou polena, dochází k těmto procesům postupně. Hoření pevných složek je v tomto případě omezováno vypařováním vlhkosti z jádra částice. Ve druhé fázi hoření, nazývané jako zplynování dochází k uvolňování  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  a uhlovodíků, které jsou míchány s kyslíkem a následně spalovány. Po ukončené zplynovací fázi zůstávají zuhelnatělé částice, které mají pórovitou strukturu. Na jejich povrchu dochází za přístupu  $O_2$  k reakcím s uhlíkem za vzniku  $CO$  a  $CO_2$ . Během těchto reakcí dochází ke vzniku nespalitelného zbytku (popelu), který je složen s anorganických látek obsažených v palivu a nedopalu [1].

### 3 Metody spalování tuhých paliv

Z předešlé kapitoly je patrné, že spalovací prostředí závisí na složení paliva, jeho fyzikálně-chemických vlastnostech a vlastnostech popelovin. V následující kapitole bude pojednáno o základních možnostech spalování tuhých paliv. Metody spalování tuhých paliv se rozdělují na tři základní skupiny a to na:

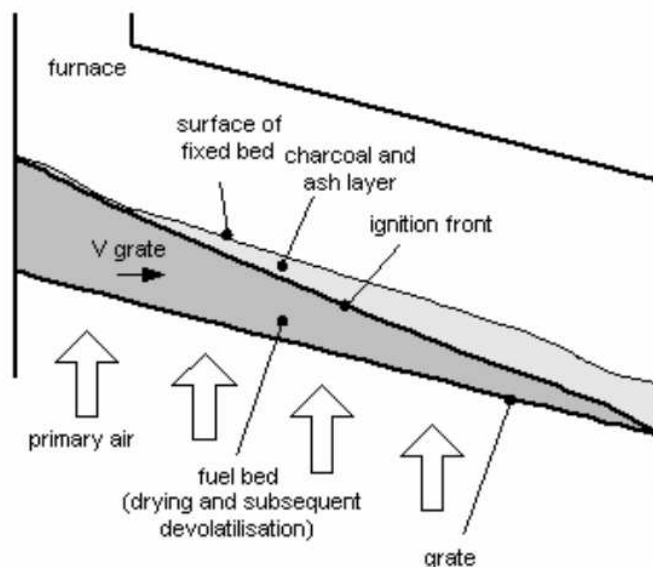
- roštové,
- práškové,
- fluidní.

S ohledem na téma diplomové práce bude roštové spalování popsáno podrobněji, než práškové a fluidní. [13]

#### 3.1 Spalování roštové

Roštové topeniště je určeno převážně pro spalování tuhých paliv, která mají definovanou velikost.

Pro tento druh spalování je vhodné na kusové dřevo nebo štěpka. Jak už bylo zmíněné ve druhé kapitole, spalováním dřeva se uvolňuje vyšší množství plynných látek než je tomu např. u uhlí. Tyto plyny (produkty pyrolýzy) tvoří 75 – 85 % spalitelných látek, které nehoří na roštu, ale v prostoru topeniště mezi roštem a vyústěním do komína, kde teplota klesá. Z toho vyplývají jisté požadavky na konstrukci topenišť. Prvním požadavkem je přívod primárního vzduchu pod rošt, který oxiduje pevné (zuhelnatělé) částice paliva. Druhým požadavkem je přívod sekundárního vzduchu nad hořící palivo, který zajistí přívod kyslíku do proudu vznikajících plynů z procesu pyrolýzy. Je nutné, aby se teplota nad roštem udržovala na zápalné teplotě hořících plynů [2]. Princip roštového spalování je znázorněn na obrázku 2.



Obrázek 2 Princip roštového spalování [16]

Funkcemi roštu je zajistit potřebné množství primárního vzduchu a jeho rovnoměrnou distribuci, přísun paliva, odvod popela, postupné vysoušení, zahřátí na zápalnou teplotu a dokonale vyhoření paliva. Rošty jsou charakteristické jejich plochou  $S_r$ , která je dána vztahem (1) [13].

$$S_r = \frac{M_{pvj} \cdot Q_i}{\bar{q}_{rj}} = a \cdot L \quad [m^2] \quad (1)$$

$M_{pvj}$ [kg/s]	spalované množství paliva
$Q_i$ [kJ/kg]	výhřevnost paliva
$q_{rj}$ [W/m <sup>2</sup> ]	stř. jmenovitý měrný tepelný výkon roštu
$a$ [m]	šířka roštu
$L$ [m]	délka roštu

Světlá plocha roštu zajišťuje přívod primárního vzduchu a je charakterizována vztahem (2) [13].

$$S_{rs} = \frac{M_{pvj} \cdot V_v}{\bar{w}_v} = \chi \cdot S_r \quad [m^2] \quad (2)$$

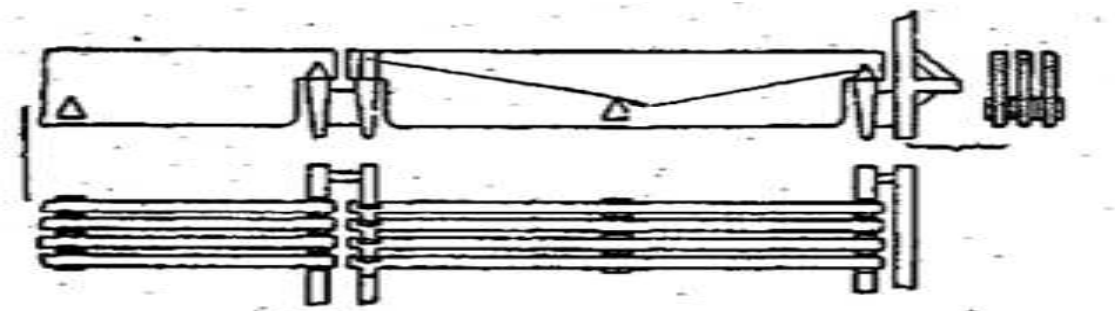
$M_{pvj}$ [kg/s]	spalované množství paliva
$V_v$ [m <sup>3</sup> /s]	spotřeba spalovacího vzduchu
$w_v$ [m/s]	rychlost vzduchu mezi roštnicemi

Roštová topeniště se dělí do dvou základních skupin:

- Topeniště s pevným roštem,
- topeniště s mechanickým (pohyblivým) roštem.

### 3.1.1 Topeniště s pevným roštem

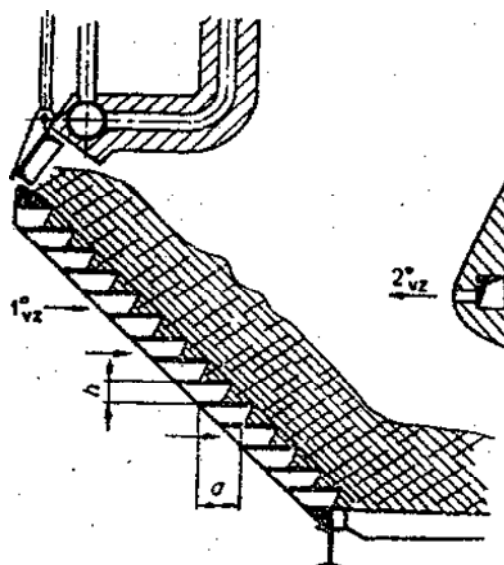
Tento druh topenišť se používá u kotlů menších výkonů z důvodu manuálního odstraňování popela, případně škváry. Pro tento druh topenišť se používá rovinných nebo stupňovitých roštů. Rovinný rošt (viz. obrázek 3) je z rovinných desek ve tvaru nosníků s nálitky [13].



Obrázek 3 Roštnice rovinného roštu [13]



Stupňovitý rošt se skládá z šikmé části (kde se palivo vysušuje, a uvolňují se plyny, které následně hoří) a vodorovné části (kde dochází k dohoření pevnému zbytku paliva), viz obrázek 4. Stupňovitý rošt je právě proto vhodný pro paliva s vyšším obsahem prchavé hořlaviny[13].



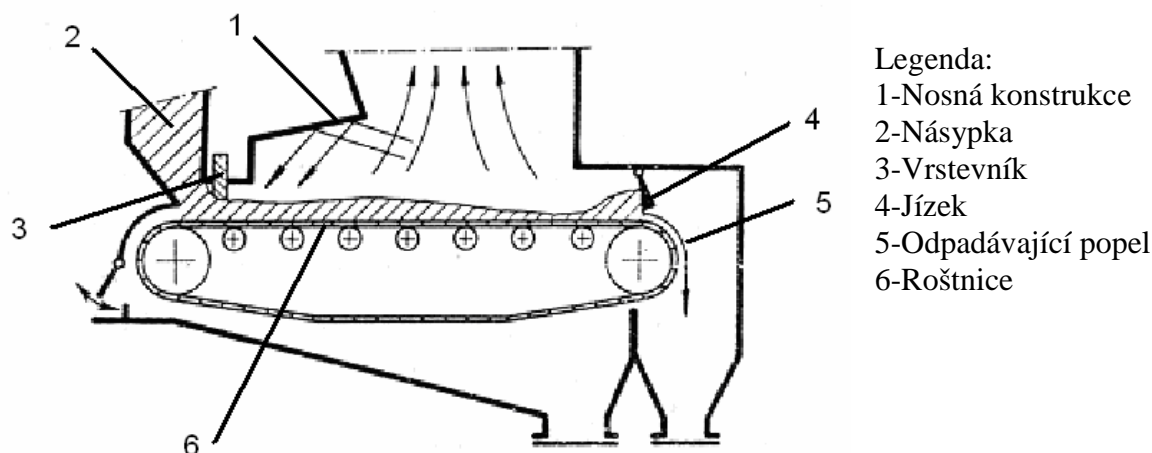
Obrázek 4 Stupňovitý rošt[13]

### 3.1.2 Topeniště s mechanickým roštěm

Tyto rošty se používají u kotlů vyšších výkonů, protože odstraňování popela se provádí mechanicky. Palivo zde již neprohořívá podél své násypné výšky, jak tomu bylo u rovinných roštnic, ale je posunováno a případně prohrabováno. Mezi základní typy mechanických roštů patří:

- pásový,
- přesuvný,
- vratisuvný.

Pásový rošt patří k nejrozšířenějším typům mechanických roštů pro spalování granulovaných paliv. Jeho znázornění je na obrázku 5. Pásové rošty se často doplňují mechanickými nebo pneumatickými pohazovači[13].

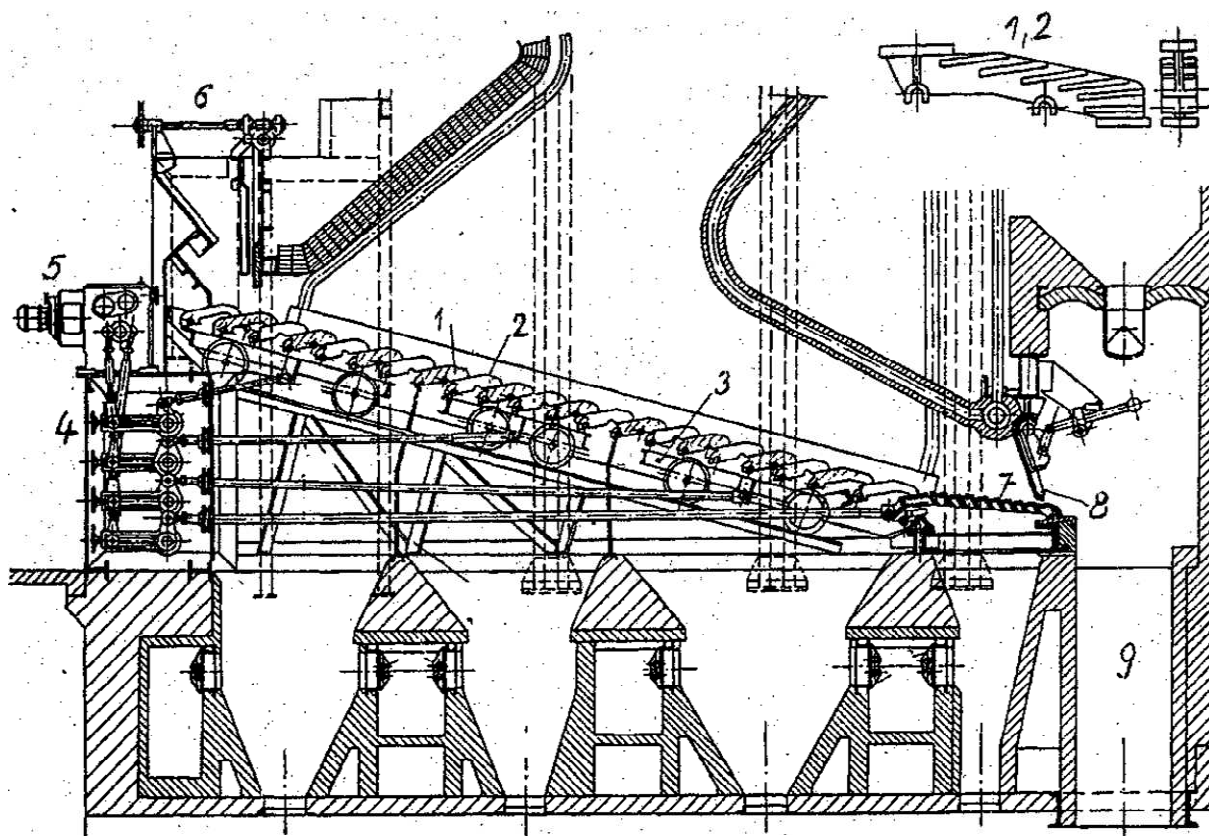


- Legenda:
- 1-Nosná konstrukce
  - 2-Násypka
  - 3-Vrstevník
  - 4-Jízek
  - 5-Odpadávající popel
  - 6-Roštnice

Obrázek 5 Rošt pásový[14]



Další typ mechanického roštu je rošt přesuvný. Tento druh roštů je vhodný jak pro dřevní štěpku, tak i pro velké balíky slámy. Na obrázku 6 je schéma přesuvného roštu pro menší částice paliv. Rozdíl mezi přesuvným a pásovým rostem je v tom, že na pásovém roštu je palivo v klidu a pohybuje se s rostem, zatímco na přesuvných rostech se palivo na roštové ploše neustále pohybuje a současně se promíchává. Přesuvný mechanický rošt vznikl zmechanizováním pevného stupňového roštu tak, že pevné roštové stupně byly nahrazeny pohyblivými. Vždy dva sousední stupně se pohybují opačným směrem. [15]

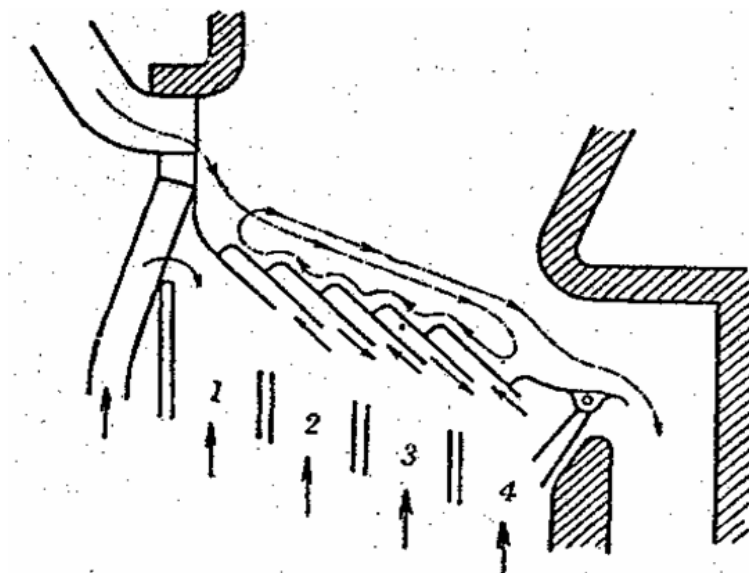


**Obrázek 6** Rošt přesuvný [13]

Legenda:

1-Pevné roštnice; 2-Pohyblivé roštnice; 3-Pohyblivé vozíky; 4-Klikový mechanismus;  
5-Elektromotor; 6-Palivová výsypka; 7-Vodorovný dohořívací rošt; 8-Výkyvný škrabák;  
9-Škvárová výsypka

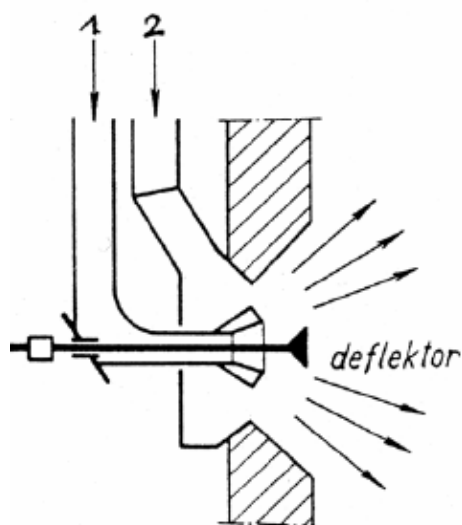
Posledním významným typem mechanických roštů je rošt vratisuvný, viz obrázek 7. Tento rošt je vhodný pro paliva s vysokým obsahem popela nebo pro paliva těžko zápalná. Konstrukce je podobná přesuvnému roštu s tím rozdílem, že je zde více pohyblivých a nepohyblivých roštnic, které jsou navíc uloženy proti směru sklonu celého roštu. To způsobuje, že se palivo průchodem topeniště nejenom pohybuje a zvedá, ale také se pohybuje směrem k násypce. Tím dochází k promíchání nového paliva s palivem již zapáleným, což umožní snadnější zapálení nového paliva. [15]



Obrázek 7 Rošt vratisuvný [13]

### 3.2 Spalování práškové

Práškové spalování se převážně využívá u kotlů vysokých výkonů, ve kterých dochází ke spálení paliva v letu. Spaluje se jemný prášek, který se přivádí do hořáků spolu se spalovacím vzduchem. Jako palivo se používá uhelný prach, který se do topenišť přivádí z mlýnů pneumaticky. Na obrázku 8 je uveden příklad kulového práškového hořáku [14],[15].



Legenda:

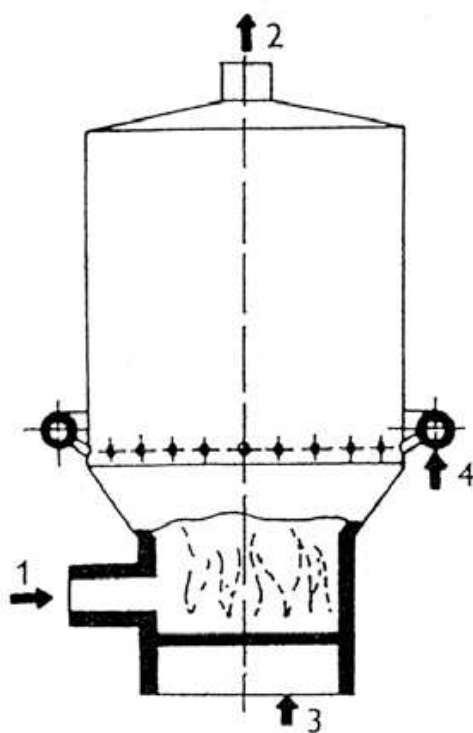
1- Prášek s primárním vzduchem

2- Sekundární vzduch

Obrázek 8 Práškový kulový hořák [14]

### 3.3 Spalování fluidní

Ve fluidním ohništi (obrázek 9) se spaluje drcené palivo ve fluidní vrstvě, kdy částice paliva a popílků jsou nadnášeny proudem vzduchu a spalin, které proudí svisle vzhůru. Aby mohla nastat rovnováha tíhy a aerodynamického odporu pro částice různé velikosti, snižuje se postupně rychlost spalin zvětšováním průtočného průřezu ohniště. Ohniště má nálevkovitý tvar. Palivo se rozvrství podle velikosti do různých výšek, větší částice se spalují ve spodní zúžené části, menší zrna v rozšířené části ohniště. Spalování ve vzhledu je charakterizováno velkým hmotovým a tepelným přenosem uvnitř vrstvy a dlouhou dobou pobytu větších částic ve vrstvě. [15]



Legenda:

- 1- Přívod odpadu
- 2- Odvod spalin
- 3- Přívod primárního vzduchu
- 4- Přívod sekundárního vzduchu

**Obrázek 9** Fluidní pec na spalování odpadů [14]

---

## 4 Přehled experimentálních reaktorů na spalování biomasy

### 4.1 Obecné charakteristika

Vývoj experimentálních reaktorů na spalování biomasy není ve světě příliš rozšířen. Oblastmi vzniku těchto zařízení jsou převážně univerzity a výzkumná centra, která jsou schopna investovat do vývoje spalování biomasy nemalé finanční prostředky.

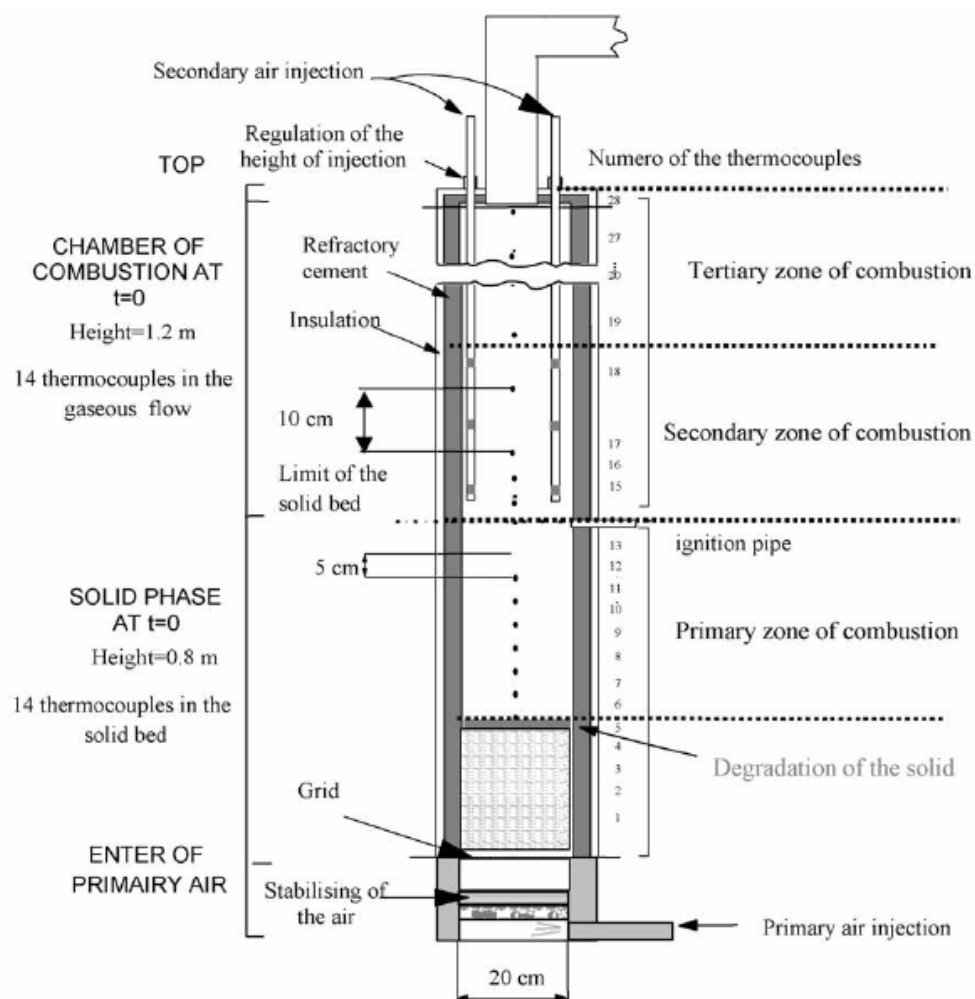
Tato experimentální zařízení jsou zpravidla jednoduché (válcové) geometrie, aby při hoření paliva docházelo k pístovému toku spalovacího vzduchu a vznikajících spalin. Lože bývá tepelně izolované, aby se experimentální měření nejvíce přibližovalo adiabatickému ději. V palivovém loži jsou umístěna měřicí čidla na snímání teplot a tlakových ztrát. Odebírají se vzorky spalin a celý systém je v průběhu spalování vážen.

### 4.2 Zkonstruované reaktory

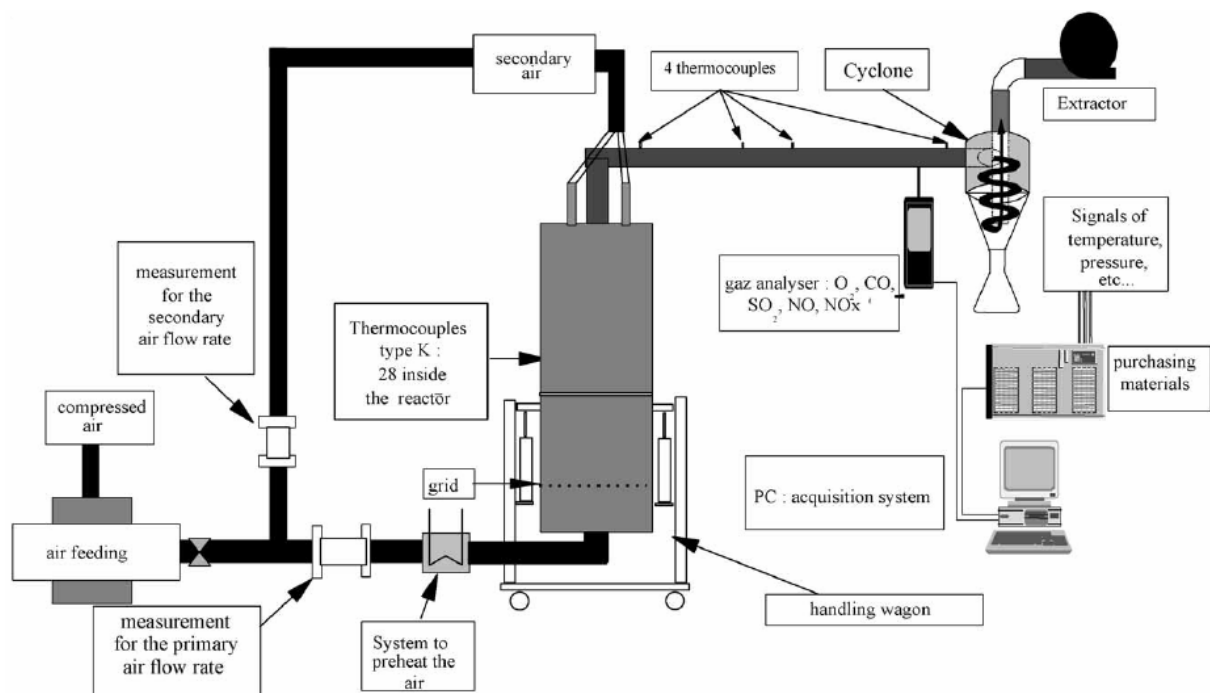
V následujícím textu bude pojednáno o nejzajímavějších experimentálních reaktorech. Kapitoly jsou pojmenovány podle místa zkonstruování.

#### ***Combustion and Detonics Laboratoty of ENSMA***

Experimentální reaktor zkonstruovaný v laboratorním institutu ENSMA ve Francii je válcového tvaru s vnitřním průměrem lože 200mm. Výška lože je 2000mm z toho je 800mm vysoké palivová část (primární) a 1200mm vysoká část (sekundární + terciální), ve které dochází k dohořívání vznikajících spalin, viz obrázek 10. Izolace se skládá ze dvou druhů. Vnitřnější vrstva izolace je tvořena žáropevnou 40mm silnou vyzdívkou, za níž následuje 40mm izolace tvořena skelným vláknem. Primární vzduch je vháněn pod lože skrze sérii perforovaných plechů, které zajistí homogenní rozvrstvení vzduchu. Zapálení paliva se provádí z horní části plynovým hořákem. Pro homogenní rozmístění plamene po celém průřezu lože se na vrchní vrstvu paliva rozmístí vrstva papíru. Do sekundární části reaktoru je vháněn sekundární vzduch dvěma trubicemi o vnitřním průměru 20mm. Primární a sekundární vzduch je během testu pevně nastavený. Průtok primárního vzduchu je možné nastavit v rozsahu  $0 - 100\text{m}^3/\text{h}$  a průtok sekundárního je v rozsahu  $0 - 50\text{m}^3/\text{h}$ . Díky systému předehřevu vzduchu, viz obrázek 11, je možné nastavit různou teplotu spalovacího vzduchu. Ke kontrole spalovacího vzduchu je použito K-termočlátku průměru 0,5mm, umístěného ve vzduchovém potrubí. Celý reaktor je uzavřený a vznikající spaliny jsou ventilátorem odtahovány ven z reaktoru do cyklonu. Ventilátor udržuje vnitřní absolutní tlak v komoře na 100 kPa. Teploty uvnitř spalovací komory jsou také pořízovány pomocí K-termočlánek průměru 0,5mm. V prostoru reaktoru je rozmístěno 28 termočláneků v různých vzdálenostech od roštu viz Obr 2. Před vstupem spalin do cyklonu je provedena jejich chemická analýza. Všechny získávané data jsou po 5 vteřinách zaznamenávány. [4]



Obrázek 10 Schéma reaktoru[4]



Obrázek 11 Zapojení reaktoru s dalším zařízením [4]

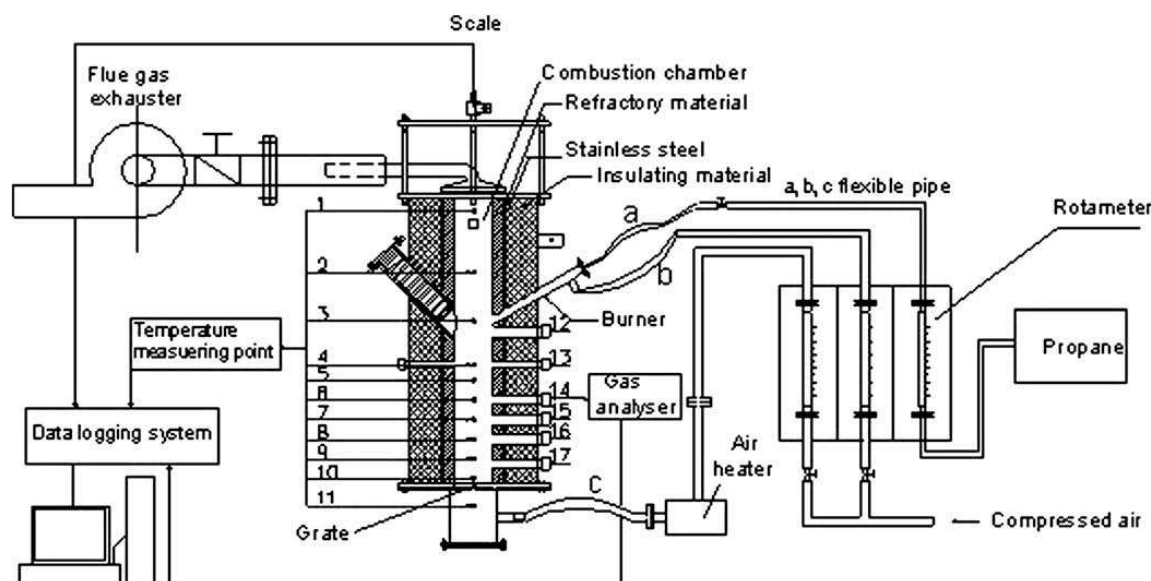
\_\_\_\_\_

Na obrázku 12 je znázorněno schéma spalovacího experimentálního reaktoru zkonstruovaného v Číně v Harbin Institute of Technology. Spalovací lože je vertikální válec zavěšený na váhách. Komora je 1,3m vysoká s vnitřním průměrem 180mm. Spalovací komora je osově souměrná, tepelně izolovaná 50mm silnou žáruvzdornou vrstvou, za kterou následuje druhý typ izolace a vnější plášť. Rošt ve spodní části reaktoru je vyroben z nerezové žáruvzdorné oceli schopný odolávat teplotám až 1200°C. V roštu je přibližně 95 otvorů o průměru 7mm, celková plocha těchto otvorů zaujímá 14,7% plochy roštu. Plynový zapalovací hořák je umístěn 750mm nad rostem, pod úhlem 45°. Měřicí konce termočlánků (T1-T11) jsou umístěny v centru lože vzdálené od roštu v různých vzdálenostech, viz tabulka 1. Vodou chlazená sonda odebírající vzorky spalin je umístěna 400mm nad rostem. [5].

V reaktoru byla spalována kukuřičná stébla o velikosti 50 ( $\pm 5$ )mm. Zapalovací výška byla na úrovni 540mm nad roštem, spalovací vzduch měl průtok  $0,053 \text{ kg m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  [5].

**Tabulka 1** Umístění měřicích konců termočlánků [5]

Měřicí konec termočlánu	Výška nad roštem reaktoru [mm]
T1	1240
T2	970
T3	750
T4	550
T5	480
T6	390
T7	300
T8	210
T9	120
T10	30
T11	-90



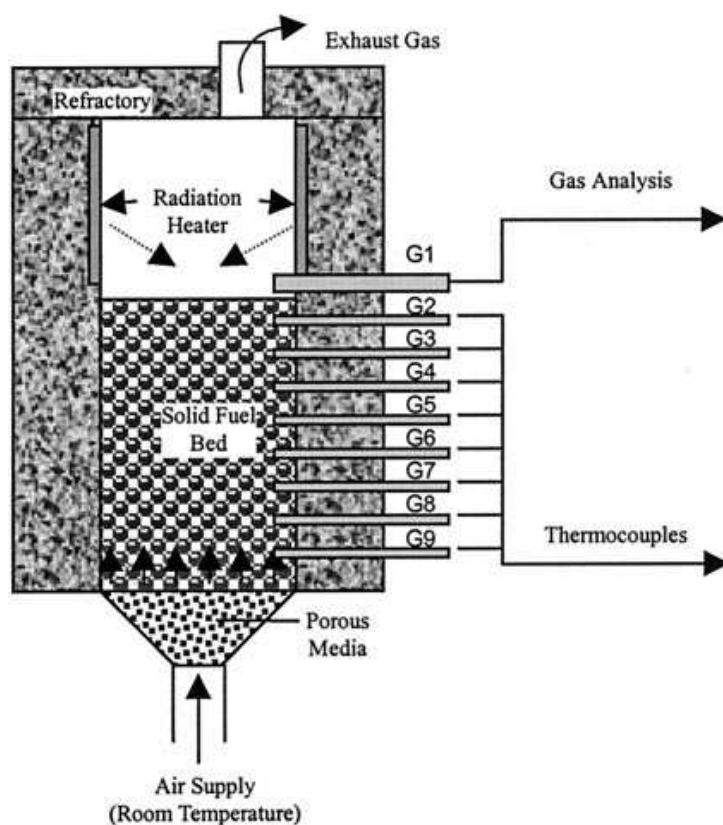
**Obrázek 12** Testovací reaktor Harbin Institute of Technology [5]



---

## Korea Advanced Institute of Science and Technology

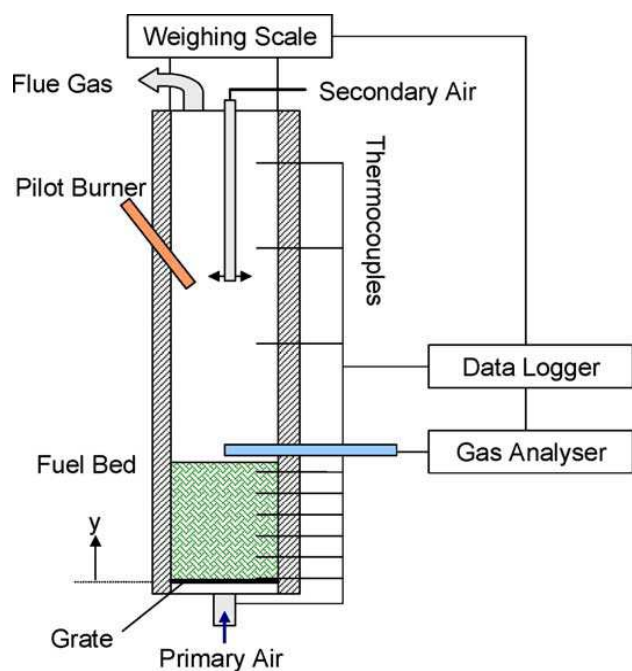
V korejském institutu vědy a techniky vyvinuli experimentální reaktor schematicky znázorněný na obrázku 13. Jedná se o symetrický válec s vnitřním průměrem palivového lože 150mm a výškou 450mm. Izolován je žárovečným materiálem o tloušťce 120mm. Z obrázku 13 je patrné, že zapalování je řešeno radiačním sáláním nad povrchem paliva. Jakmile teplota zářiče dosáhne 850°C dojde k zapálení paliva. Během prohořívání paliva dochází ke kontinuálnímu měření teploty a k analýze složení spalin. Měření teploty je prováděno osmi termočlánky typu K. K měření spalin je použito paramagnetického analyzátoru. V reaktoru je testováno palivo tvaru krychle o rozměrech  $a = 10\text{--}30\text{ mm}$ . Pro experimenty prováděné na tomto reaktoru se palivu záměrně zvyšovala vlhkost a přidával se popel, aby byly lépe simulovány fyzikální a chemické vlastnosti skutečných odpadů. Tento reaktor nemá rošt v podobě perforovaného plechu, ale místo něj je použito pórovitých keramických částic, které umožní pronikání vzduchu do lože a jeho homogenní rozložení. Intenzita spalujícího vzduchu se pohybuje v rozsahu 10-850l/min v závislosti na charakteru paliva. [6]



**Obrázek 13** Schéma experimentálního reaktoru z korejského institutu vědy a techniky[6]

## Sheffield University Waste Incineration Centre

Základem reaktoru zkonstruovaného na sheffieldské univerzitě ve Velké Británii je válcová spalovací komora, zapalovací plynový hořák, rošt, přívod primárního a sekundárního vzduchu a měřicí a vážicí systém. Schematické znázornění aparátu a jednotlivých částí je znázorněno na obrázku 14. Komora reaktoru je vyrobena z niklové slitiny s vnitřním průměrem 200mm a výškou 1500mm. Okolo stěny spalovací komory je 8cm izolace. Spalování experimentálního paliva je možné monitorovat pomocí 10 termočlánků typu K. Z toho 7 termočlánků je rozmístěno ve spodní části do výšky 430mm od roštu. Analyzátor spalin měří koncentraci  $O_2$ ,  $CO$  a  $CO_2$ , jeho umístění je znázorněno také na obrázku 14. Reaktor je zavěšen na dvou vážících ramenech, majících 4 váhová čidla, za účelem kontinuálního sledování hmotnostního úbytku během hoření. Přesnost vážení se pohybuje v rozsahu  $\pm 20g$  v závislosti na hmotnosti vloženého vzorku paliva. Nicméně vlivem tepelné roztažnosti materiálu a měnícím se průtokem spalovacího vzduchu je vážení na konci nepřesné. Data z měření teplot, koncentrací složek spalin a hmotnostních úbytků jsou zaznamenávána každých 15 nebo 30 sekund. [7]



**Obrázek 14** Schéma reaktoru[7]



**Obrázek 15** Reálně znázorněný reaktor[7]

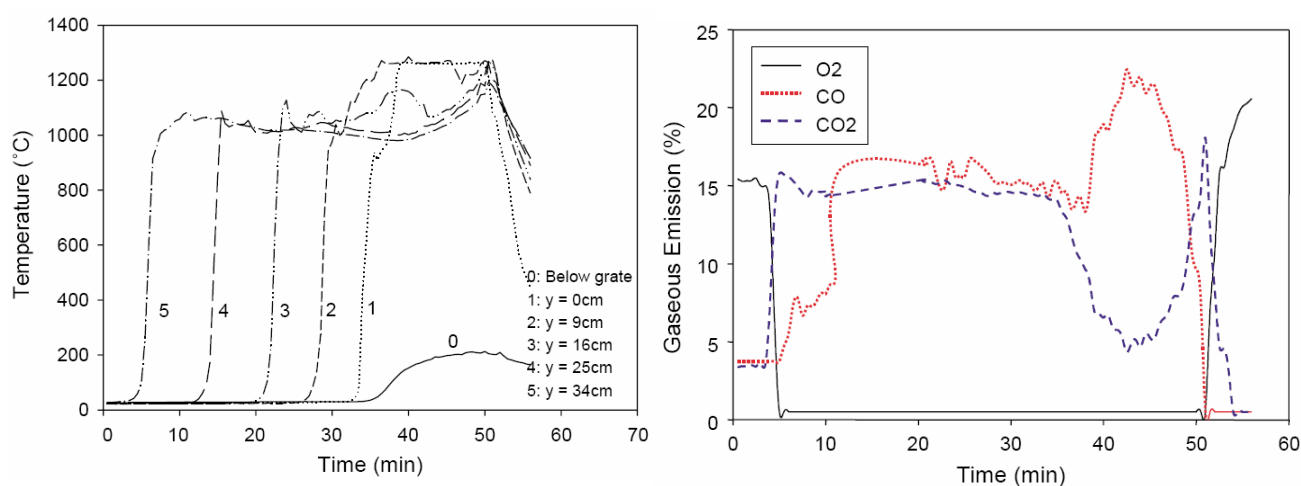


Podmínky spalování se liší, v závislosti na použitém palivu. Tabulka 2 pojednává o charakteristikách paliva, výškách lože (plnění) a průtoku spalovacího vzduchu. Spalovací vzduch je do reaktoru vháněn při pokojové teplotě. Průtok sekundárního vzduchu je trvale nastaven na hodnotě 100 l/min[7].

**Tabulka 2** Charakteristika paliva, výška lože a průtok spalovacího vzduchu[7]

Druh paliva	Tvar vzorku	Sypná hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Výška lože [mm]	Průtok spalovacího vzduchu [l/min]
Vrbová štěpka	do 35mm	181	520	120
			410	160
			400	200
Pelety Miscanthus	Ø 4mm	660	400	120
			350	160
			400	200
Pelety z odpadních pilin	Ø 7mm	715	360	120
			350	160
Krychle borovice	a=5mm	285	350	160
	a=10mm	272	375	160
	a=20mm	285	360	160
	a=35mm	295	360	160

Pro představu interpretace výsledků měření jsou na obrázku 16 uvedeny naměřené data. Graf vlevo charakterizuje průběh teplot měřených v různých vzdálenostech od roštu. Koncentrace složek plynů ve spalínách je znázorněna na grafu vpravo. Měření bylo provedeno na krychlích borovice o rozměru a=20mm[7].



**Obrázek 16** Graf průběhu teplot (vlevo), koncentrace plynů ve spalínách (vpravo) [7]

### 4.3 Závěrečné shrnutí experimentálních reaktorů

Veškeré zmíněné experimentální reaktory na spalování biomasy jsou principiálně podobné. Pravidlem ale zůstává, že všechny spalovací komory jsou válcového tvaru, v průběhu prohořívání lože dochází k měření teplot, odebírání vzorků spalín a mnohdy dochází k zaznamenávání hmotnostních úbytků. Pro přehlednost jsou v tabulce 3 uvedeny technické parametry jednotlivých experimentálních reaktorů. Žlutou barvou jsou označena zařízení, která byla již v textu popsána. Zbýlá zařízení jsou principiálně podobná, a proto nevyžadují podrobnější popis.

**Tabulka 3** Přehled experimentálních reaktorů[8] [9] [10]

Misto	Komora		H <sub>lože</sub> [mm]	Izolace		Termočlánky	Vážení	Analyzátor spalín	Zapalování
	ØD <sub>in</sub>	H		typ	w [mm]				
ENSMA Francie	200	2000	800	Sibral	40	28	-	Ano	Plynový hořák
				Skelné vlákno	40				
Sheffield Velká Británie	200	1500	410 - 520	Vnější - Skelné vlákno	80	11	Ano	Ano	Plynový hořák
			350 - 375		30				
			350 - 400						
			350 - 360						
Lyngby Dánsko	150	1370	-	Vnější - kaowool	-	8	Ano	Ano	Radiační zářič
Taejon Korea	150	-	450	Sibral	120	8	Ne	Ano	Radiační zářič
VTT Energy Finsko	244	-	300	-	-	Ano	Ano	Ano	-
Harbin Čína	180	1300	540	Sibral	50	11	Ano	Ano	Plynový hořák
				Skelné vlákno	-				
Apeldoorn Nizozemsko	150	1500	-	-	-	6	Ano	Ano	Radiační zářič

pozn.: pomlčka (-) znamená, že daná charakteristika nebyla nalezena

Důležitou charakteristikou těchto zařízení bývá jejich vnitřní průměr lože. Čím menší je průměr, tím více může být simulace spalování nepřesná. Pokud je průměr lože příliš velký, je potřeba více materiálu a zařízení se stává těžší. S tím jsou pak spojeny další technické problémy. Ze zjištěných informací vyplývá, že optimální průměry lože se pohybují v rozsahu 130 - 244mm. Výška lože je poměrně různá a je závislá na sypné hustotě paliva. Z výšky lože se odvíjí i celá výška reaktoru. Zpravidla platí, že by nad ložem měl být prostor o velikosti 1,5 - 2 krát průměru lože bez geometrických změn.

Přívod primárního spalovacího vzduchu je umožněn přes pevný perforovaný plech, vyrobený většinou z žárovevné oceli. Přívod sekundárního vzduchu u některých reaktorů není realizován. Pokud je sekundární vzduch přiváděn, stávají se reaktory větší, aby v nich došlo k dohoření spalitelných složek.

Pro přiblížení se adiabatickému ději jsou zvoleny vhodné izolace a jejich tloušťky. Nejčastěji používaná izolace je založena bázi hlinítokřemičtých vláken. Pro zvýšení izolačních vlastností je použito dvou druhů izolace, jak je tomu např. u reaktoru vyvinutého ve Francii.

---

Zapalování paliva je realizováno dvěma způsoby. Velmi často používaným způsobem je použití plynových hořáků. Tyto hořáky se umísťují na plášť pod určitým uhlím, aby co nejrovnoměrněji zapálily vrchní vrstvu paliva. Mohou hořet buď do zapálení paliva, nebo po celou dobu experimentu. Pokud hoří po celou dobu experimentu, nastává riziko, že dojde k ovlivnění měření.

Další způsob zapálení paliva je pomocí radiačního zářiče. Tento způsob je výhodnější z hlediska počátečních podmínek zapalování, avšak pro paliva které mají vysokou teplotu zapálení, musí zářiče dosahovat vysokých výkonů a s tím je spojena vysoká hmotnost.

Velice důležitou součástí experimentálních reaktorů na výzkum spalování biomasy je měřicí zařízení. K měřícím fyzikálním veličinám patří teplota, analýza spalin a úbytek hmotnosti paliva během hoření paliva.

Teplota je snímána termočlánky umístěnými zpravidla ve středu lože a rozdílný bývá jen jejich počet, který je většinou závislý na výšce palivového lože. Analýza spalin je prováděna odběrem vzorků a následným vyhodnocováním. Odběr je prováděn většinou z jednoho místa nad vrchní vrstvou lože, kde nehrozí ovlivnění sekundárním vzduchem. Měření a zaznamenávání úbytků hmotnosti paliva během hoření je komplikovaný problém, jehož řešení není nikde podrobně popsáno.

Tato experimentální zařízení by měla také poskytovat určitou variabilitu nastavení, která zajistí širší spektrum zkoušených paliv a nastavení spalovacích podmínek.

---

## 5 Návrh experimentálního reaktoru

Úkolem experimentálního reaktoru je simulovat reálné zařízení na spalování biomasy, které bude umožňovat dobrou regulovatelnost spalovacího procesu a sběr kvalitních dat, zejména teplot, hmotnostních úbytků a složení plynů. Tyto data musí být zaznamenávány v reálném čase.

### 5.1 Požadavky na experimentální reaktor

Návrh experimentálního reaktoru musí splňovat řadu technologických a konstrukčních požadavků, které jsou:

- simulace adiabatického spalování
- regulace spalovacího procesu
- měření - teplot, tlaků, hmotnostních úbytků, chemického složení spalin
- vizuální kontrola spalování
- manipulovatelnost se zařízením
- spalování různých typů vzorků biomasy
- jednoduché údržby

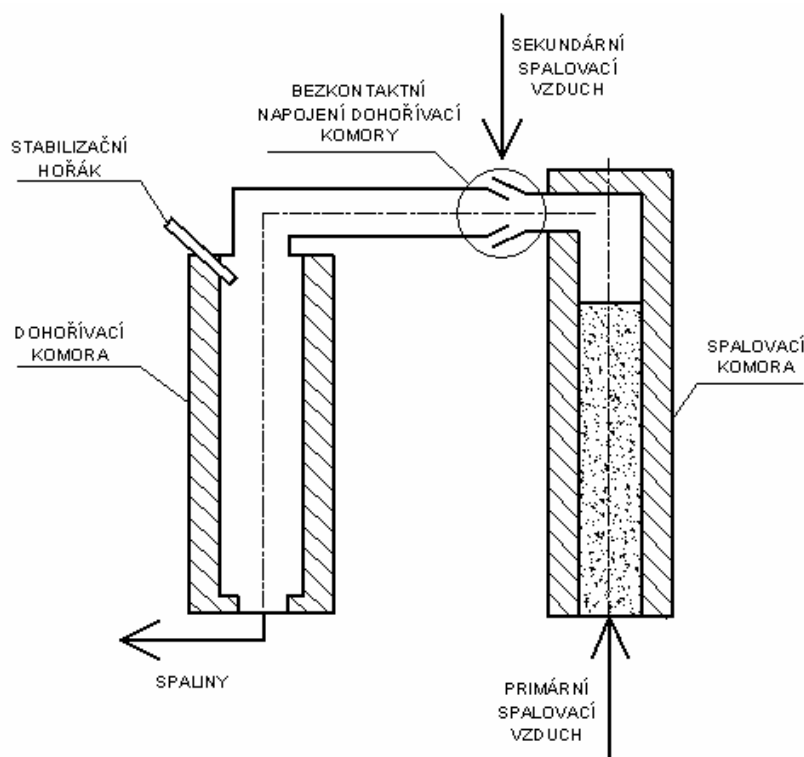
Experimentální zařízení musí také splňovat omezení na celkovou výšku, která nesmí přesáhnout 2200mm.

## 5.2 Koncepční návrh reaktoru

Základní úvaha vedoucí k optimálnímu návrhu reaktoru je zamyšlení se nad významem přívodu sekundárního vzduchu do spalovací komory. Proud sekundárního vzduchu se do spalovací komory musí přivádět v dostatečné vzdálenosti od měřicího zařízení, aby neovlivnil jednotlivá měření. Většinou se přivádí ve vzdálenosti  $(1,5 \text{ až } 2) \times \varnothing D_{IN}$  od vrchní vrstvy lože. Z hlediska správnosti experimentálního měření není přívod sekundárního vzduchu do spalovací komory nutný, a proto je možné tento vzduch přivádět do nevyhořelých spalin mimo spalovací prostor reaktoru.

Základní návrh experimentálního zařízení je schematicky zobrazen na obrázku 17. Skládá se ze spalovací komory, dohořívací komory a spojovacího členu. Primární spalovací vzduch musí být bezkontaktně napojen na spalovací komoru, kde dochází ke spalování paliva a měření. V dohořívací komoře je vytvořen mírný podtlak vůči atmosférickému, který nasává vznikajících spalin, ze spalovací komory a sekundární vzduch. Sekundární vzduch je přisáván štěrbinou vzniklou bezkontaktním spojem, tento spoj je schematicky znázorněn na obrázku 17. Bezkontaktní spoj dalších částí zařízení se spalovací komorou je nutný z hlediska měření hmotnostních úbytků paliva, protože jakýkoli kontakt spalovací komory s okolím by ovlivnil vážení. Vznikající spaliny spolu se sekundárním vzduchem proudí do dohořívací komory, kde pomocí stabilizačního hořáku dochází k dohoření spalitelných plynů. Hlavní účel stabilizačního hořáku je zvýšení teploty spalin na zápalnou teplotu spalitelných plynů. Dohořívací komora je napojena na stávající zařízení (spalovací komoru zkušebny hořáků), skrze kterou jsou spaliny odváděny do komína. Podtlak je vytvářen ejektorem umístěným v komíně pomocí vzduch dodávaného ventilátorem.

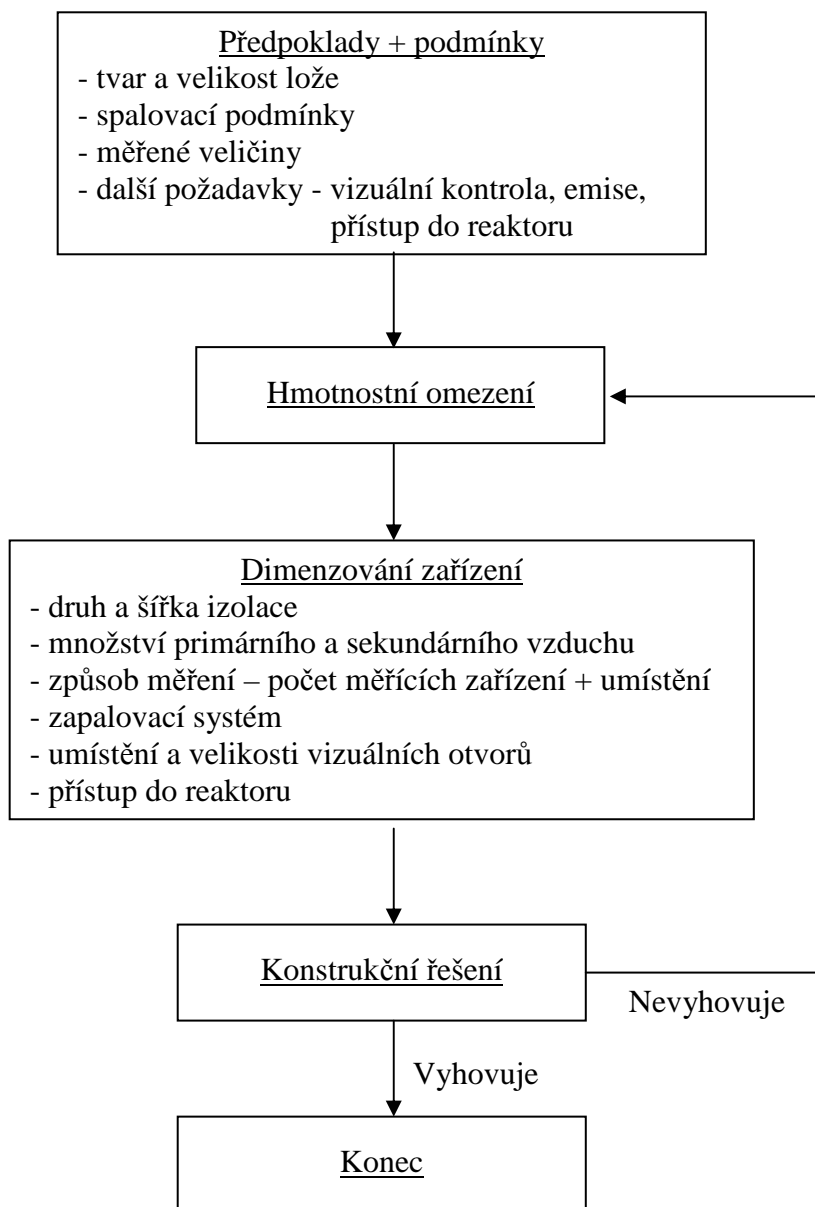
Výhodou tohoto návrhu experimentálního reaktoru, oproti ostatním zmíněným zařízením v rešeršní části je, že spalovací prostor, ve kterém probíhá experimentální měření, je menší o dohořívací část komory. Tímto se zvýší přesnost měření hmotnostních úbytků (podrobněji popsáno v textu níže) a sníží se celková výška zařízení. Bezkontaktní napojení spalovací komory s dohořívací komorou navíc způsobí přísun sekundárního vzduchu.



Obrázek 17 Koncepční návrh experimentálního reaktoru

S ohledem na vytvořený návrh, viz obrázek 17, se bude postupovat v jednotlivých krocích směřující ke konečnému řešení.

V první fázi návrhu je třeba stanovit velikost a tvar lože a předpoklad spalovacích podmínek. Dále je třeba stanovit, jaké měřené veličiny budeme během spalování vyhodnocovat, a jak toto měřicí zařízení bude rozmístěno v palivovém loži, popřípadě mimo něj. Musí být také stanoveny další požadavky, jako jsou např. vizuální pozorování spalovacího procesu, umožnění přístupu do reaktoru, nebo rozebíratelnost. Na základě těchto požadavků bude proveden konstrukční návrh, který se bude řídit následujícím návrhovým schématem.



---

### 5.2.1 Předpoklady a spalovací podmínky

K zajištění pístového toku vzduchu a spalin je volen válcový tvar spalovací komory. Vnitřní průměr lože by neměl být příliš malý z důvodu rizika snížení reálné teploty spalování tepelným tokem do pláště reaktoru. Také by neměl být příliš velký, neboť s tím souvisí vysoká hmotnost celého zařízení. Výška lože je určitým způsobem závislá na druhu spalovaného paliva. Čím bude palivo výhřevnější a objemově těžší, tím bude výška lože menší. V opačném případě bude výška lože vyšší. Dostáváme tak limitující podmínku na objem paliva a hmotnost paliva.

Z předchozí kapitoly, pojednávající o již zkonstruovaných reaktorech, nevyplývá žádné pravidlo určující velikost lože, je tedy nutné provést odborný odhad, viz tabulka 4.

**Tabulka 4** Parametry palivového lože

Vnitřní průměr lože $\varnothing D_{IN}$ [mm]	200
Výška lože H [mm]	max.1050
Hmotnost paliva [kg]	max.18

Spalovacími podmínkami se rozumí průtok a teplota spalovacího vzduchu. Tyto parametry jsou opět závislé na druhu paliva, je proto účelné aby zařízení disponovalo variabilním nastavením těchto podmínek. Dále se spalovacími podmínkami rozumí teplota plamene prohořívajícího lože, která je stanovena na 1300°C. Tato teplota byla stanovena jako maximální teplota hoření, která může při spalování daných tuhých paliv v reaktoru nastat. Doba hoření paliva se bude pohybovat v rozmezí od 20 do 60 minut v závislosti na zkoušeném palivu a výšce lože.

Během spalování paliva bude prováděno nezávislé měření následujících veličin:

- teplota,
- hmotnost,
- analýza spalin,
- tlakové difference.

Je nutné stanovit i přesnost měřených dat, která se odvíjí (s výjimkou měření hmotnosti) od použitého měřicího zařízení a na samotnou konstrukci nemá velký vliv. Přesnost snímání úbytků hmotnosti je nepřímo úměrná hmotnosti váženého celku. Pokud chceme snímat hmotnostní úbytky s velkou přesností, musí mít vážený celek co nejmenší hmotnost. V kroku „Hmotnostní omezení“ bude určena mezní hmotnost váženého zařízení s ohledem na metodu vážení a zvolený druh vážícího zařízení. Musíme taky zajistit bezkontaktnost váženého celku s okolím (zejména napojení spalovacího vzduchu). Umístění jednotlivých měřících zařízení bude uvedeno později, v dalším kroku návrhu.

Jak už bylo zmíněno, konstrukce musí umožňovat vizuální kontrolu hoření, přístup do reaktoru, rozebíratelnost a manipulovatelnost se zařízením.

### 5.2.2 Hmotnostní omezení

S ohledem na měření hmotnostních úbytků je třeba se zamyslet, jakým způsobem toto měření budeme provádět. Jedna z možností je, že celý reaktor umístíme na vážící elementy, které budou během hoření paliva zaznamenávat úbytky hmotnosti. Druhou možností je, reaktor na vážící elementy zavěsit, a tím zajistit i vyšší stabilitu reaktoru než v předchozím případě. V obou případech je ovšem nutná bezkontaktnost s okolím.

Přesnost vážení všech vážících zařízení se odvíjí od kapacity daného zařízení. Obvykle bývá přesnost několik desetin procenta z rozsahu vážení. Tedy pokud máme váhové čidlo s kapacitou 100 kg a přesnosti  $\pm 0,15\%$  z rozsahu, je reálná přesnost vážení 150 g. Je proto účelné minimalizovat hmotnost váženého celku a tím maximalizovat přesnost vážení. Z informací o váhových zařízeních, jsme určili limitní hmotnost váženého celku, která je odhadnuta na 150 kg.

Pokud nebude reálné této hmotnosti dosáhnout, bude nutné přehodnotit tuto limitní hmotnost, nebo se zamyslet nad změnou požadavků a podmínek kladených na experimentální reaktor.

### 5.2.3 Dimenzování zařízení

Po upřesnění požadavků a podmínek je možné přistoupit k samotnému dimenzování zařízení. V následujícím textu bude pojednáno o jednotlivých částech zařízení a určení jejich parametrů.

#### Izolace

Významnou částí každého experimentálního reaktoru je izolace palivového lože. Z hlediska umístění izolace rozeznáváme dva druhy izolování, a to na vnitřní, nebo vnější. Vnější typ izolace je použit např. u reaktoru ze sheffieldské univerzity, kde je vnitřní ocelový plášť obalen vnější izolací většinou v podobě rohože ze skleněných vláken. Nevýhodou tohoto typu izolování je, velké tepelné zatížení ocelového pláště. U vnitřních izolací se používá žáropevných materiálů na bázi hlinitokřemičitých vláken, kterými se vyzdí vnitřní prostor lože. V tomto případě už není plášť reaktoru tolik tepelně zatížen, ale nevýhodou je vyšší hmotnost, tepelná kapacita a také tepelná vodivost. Porovnání těchto dvou izolačních materiálů je v tabulce 5. Tepelná vodivost není u těchto materiálů konstantní, ale závisí na teplotě. Přesnější informace o izolacích jsou uvedené v příloze 3.

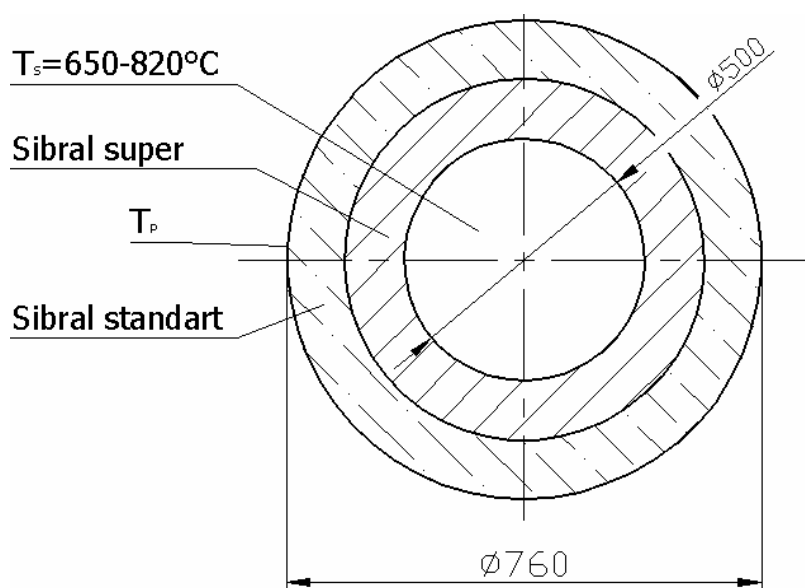
**Tabulka 5** Porovnání izolačních materiálů

Druh izolace	Rohože z hlinitokřemičitých vláken	Desky z hlinitokřemičitých vláken
Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	100 - 160	300 - 400
Tepelná kapacita [kJ/kg.K]	1,13	1,2
Tepelná vodivost [W/m.K]	0,073 - 0,406	0,088 - 0,265



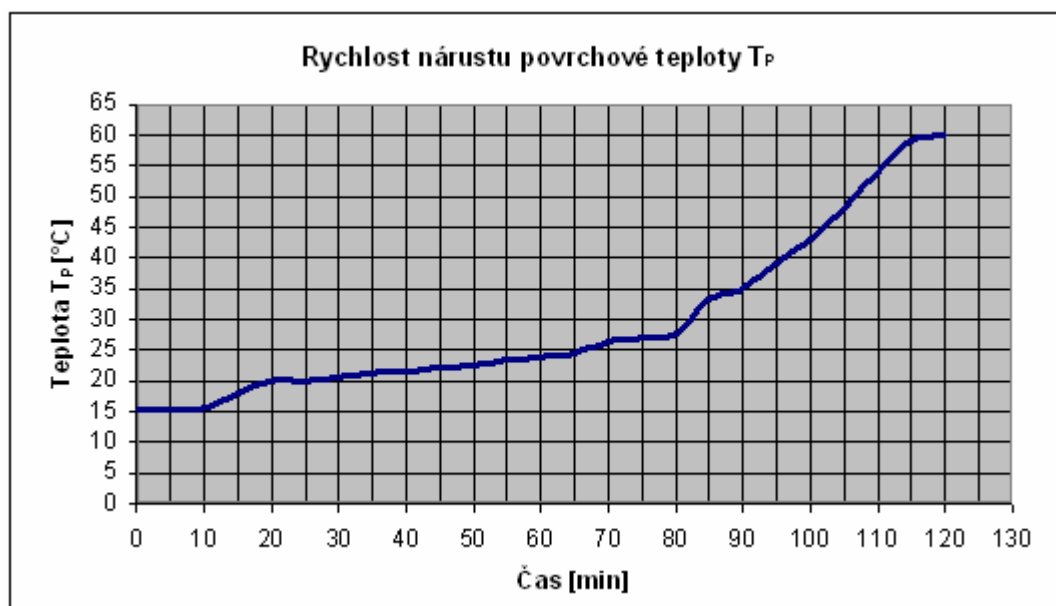
Pro experimentální reaktor je zvolený vnitřní typ izolování na bázi hlinitokřemičitých vláken. Při návrhu tloušťky musíme přihlédnout k několika aspektům. Jedním z nich je doba spalovacího procesu. Pokud je tato doba menší, než je doba, za kterou se tepelná energie ze spalování paliva naakumuluje do izolace, nemůžeme mluvit o stacionárním tepelném toku. V takovém případě je třeba použít diferenciálních rovnic, kde je přestup tepla závislý i na čase.

V našem případě jsme tloušťku izolace nenavrhovali výpočtem diferenciálních rovnic, ale pomocí experimentu pořízeného na obdobném typu izolace v laboratoři zkušebny hořáku na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Schematické znázornění měření, které se provádělo na kouřovodu spalovací komory, je znázorněno na obrázku 18. Kouřovod je složen ze dvou druhů izolace. Vnitřní část izolace je provedena z hlinitokřemičitých rohoží s klasifikační teplotou 1430°C. Vnější vrstva izolace je z obdobného materiálu s tím rozdílem že se jedna rohože s klasifikační teplotou 1260°C, podrobnější informace o těchto izolacích jsou v příloze 3. Vnitřní teplota  $T_s$  se během celého měření pohybovala v rozmezí 650 až 820°C, teplota okolí byla 15°C a teplota  $T_p$  byla zaznamenávána v 5 minutových intervalech. Vnitřní povrch kouřovodu tvoří žáruvzdorný plech a vnější je tvořen nerezovým ocelovým pláštěm. Na obrázku 19 je závislost povrchové teploty kouřovodu na čase.



**Obrázek 18** Schéma spalinovou

Z grafu je patrné, že nejstrmější nárůst teploty  $T_P$  nastal až po 80 minutách. S ohledem na tento experiment a informace z rešeršní části o experimentálních reaktorech, je pro experimentální reaktor zvolena izolace hlinitokřemičitých vláken (Sibral super) o tloušťce 100mm.



**Obrázek 19** Závislost povrchové teploty kouřovodu na čase

### Množství primárního a sekundárního

Z principu spalování tuhých paliv obsahujících velké množství zplyňujících složek vyplývá, že pro optimální spálení těchto paliv musí být spalovací vzduch rozdělen do dvou proudů a to do primárního a sekundárního. Množství jednotlivých proudů není fixní, ale liší se pro každý druh paliva.

Tabulka 6 udává rozmezí průtoků primárního a sekundárního vzduchu. Tyto hodnoty byly stanoveny na základě konzultace s vedoucím diplomové práce a s lidmi, kteří se zabývají problematikou spalování tuhých paliv v pevném loži.

**Tabulka 6** Množství primárního a sekundárního vzduchu

Druh vzduchu	Průtok		
	[kg/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[l / s]
Primární vzduch	0,0065	0,00504	5
Sekundární vzduch	0,0050	0,00388	3,9

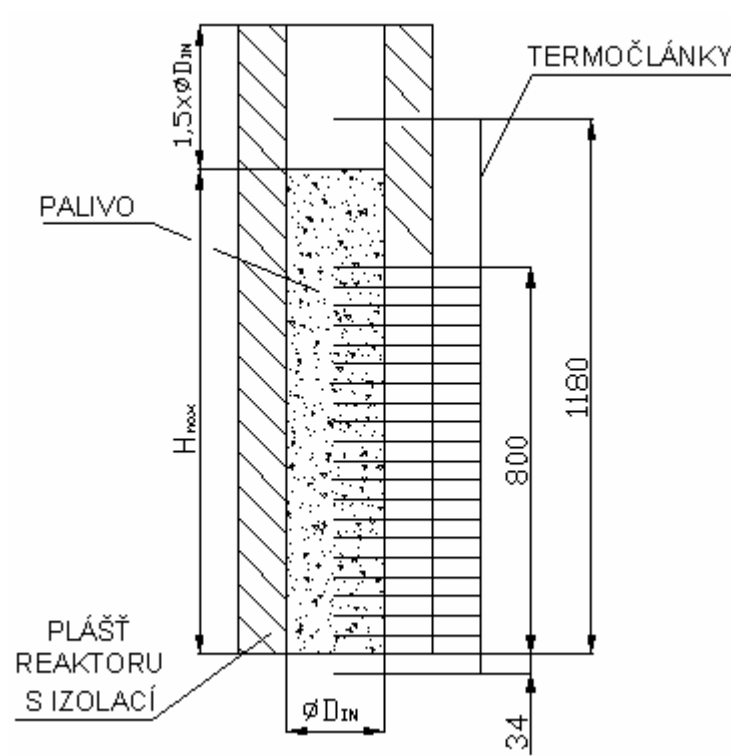
Jak již bylo zmíněno výše, sekundární vzduch nemá na smysl měření žádný vliv, jeho hlavní účel spočívá ve zvýšení stechiometrického množství kyslíku v nevyhořelých spalinách. Z toho důvodu se může sekundární vzduch přivádět do nevyhořelých spalin mimo spalovací komoru.

## Měření

Měření je jednou z nejdůležitějších funkcí experimentálního reaktoru a jsou na něj kladeny vysoké požadavky. Náklady na měřicí zařízení tvoří proto největší podíl z celkových nákladů na realizaci experimentálního reaktoru.

V současné fázi návrhu, je již známa velikost palivového lože, druh a tloušťka izolace, proud spalovacího vzduchu a maximální možná teplota uvnitř lože. Na základě těchto informací bude rozhodnuto, jakým způsobem se budou pořizovat experimentální data.

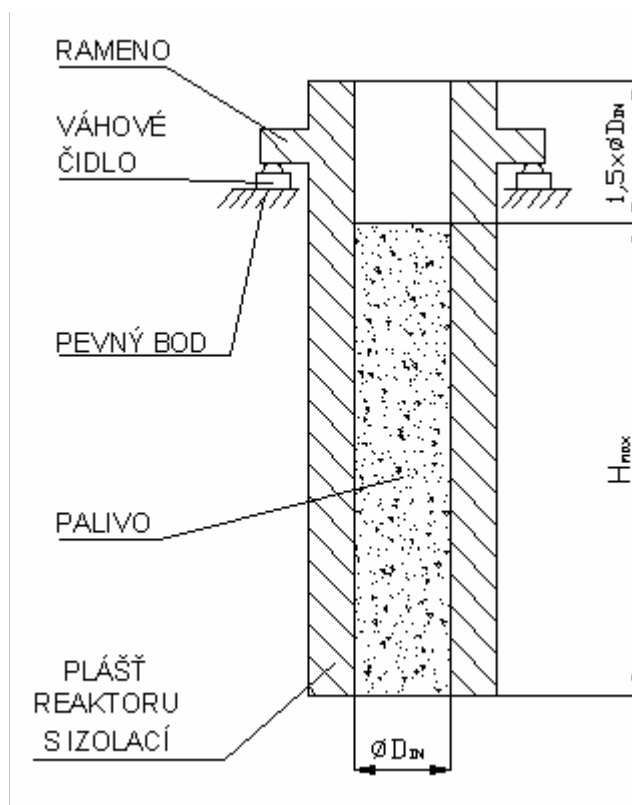
Pro měření teploty je nejvýhodnější použít K-termočlánek odolávající oxidačnímu prostředí a teplotám do 1300°C. Rozmístění jednotlivých termočlánků je zobrazeno na obrázku 20. Je patrné, že celkový počet termočlánků je 22 a z toho je 20 rozmístěných v loži paliva se 40mm vzdálenostmi a zbylé 2 jsou umístěny mimo lože podle obrázku.



**Obrázek 20** Rozmístění termočlánků v experimentálním reaktoru

Termočláanky jsou vybrány s ohledem na prostředí v reaktoru během hoření paliva, tedy teplotám do 1300°C a prostředí O<sub>2</sub>, CO, a CO<sub>2</sub>. Takovým požadavkům vyhovují termočláanky např. od firmy Omega engineering. Vhodný termočláanek pro tyto podmínky je např. typu K o průměru 3mm s přesným označením TJ36-CAXL-M30[G]-[18] (podrobnější informace jsou uvedeny v příloze 1).

Dalším důležitým měřením během spalování paliva v experimentálním reaktoru je zaznamenávání hmotnostních úbytků. Tento problém je už částečně popsán v bodě 5.2.2 této kapitoly. Pro funkci vážení je zvoleno třech nízkoprofilových tlakových čidel, na které se umístí spalovací komora reaktoru. Z kritéria na hmotnostní omezení, které činí 150kg, vybereme vhodné tlakové čidlo. Takovým požadavkům odpovídá např. tlakové čidlo LCM305-500N, taktéž od firmy Omega Engineering. Měřicí rozsah u tohoto váhového zařízení je od 0 do 50,98 kg a přesnost  $\pm 0,15\%$  z rozsahu. Přesnější informace jsou uvedeny v příloze 2.



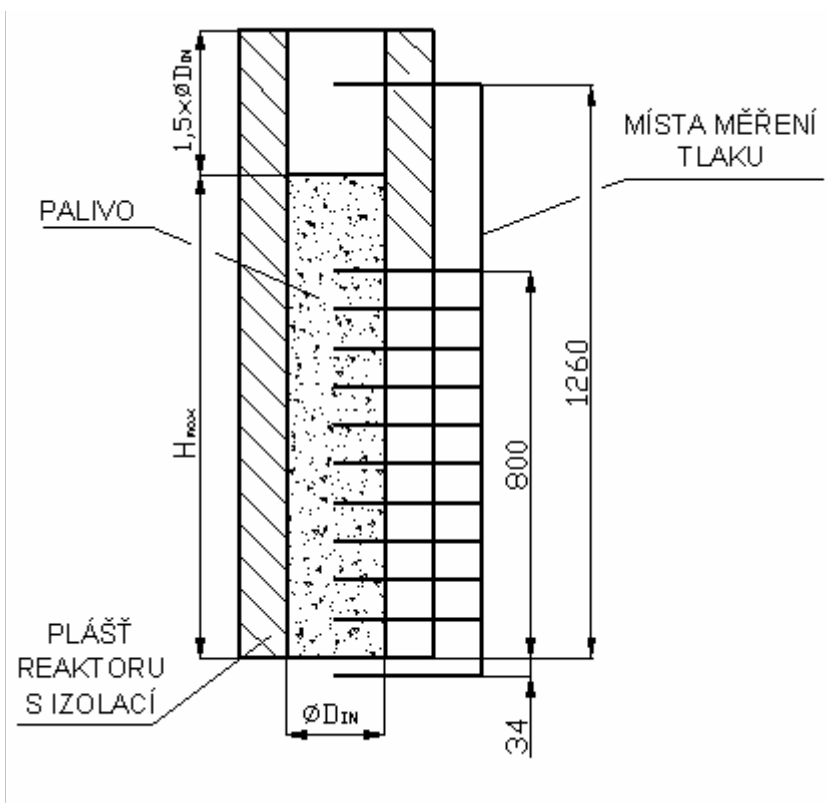
**Obrázek 21** Umístění váhových čidel

Váhová čidla jsou umístěna na třech pevných plochách a na nich je potom usazena spalovací komora reaktoru, viz obrázek 21. Komora je na čidlech umístěna pomocí třech ramen, která jsou součástí vnějšího pláště spalovací komory. Přesná výška umístění váhových čidel zatím není známá, ta vyplyne až z konstrukčního řešení.

Jak již bylo uvedeno v textu výše, je nutné zajistit, aby daný vážený celek (spalovací komora) nebyl během měření v kontaktu s žádným pevným tělesem, které by vážení negativně ovlivnilo. Způsob napojení odtahu spalín ze spalovací komory byl již naznačen v textu výše a bezkontaktní přívod daného množství vzduchu bude uveden v části „Konstrukční řešení“.

Mezi další měření patří snímání tlakových ztrát spalujícího vzduchu průchodem skrz lože, nebo přes hořící vrstvu paliva. Tlak ve spalovací komoře se bude pohybovat přibližně v rozsahu -0,5 až 2 kPa. Tento tlak je relativní a je vztažen vůči atmosférickému. U návrhu toho zařízení je nutné mít také na paměti jeho celkovou hmotnost, protože bude-li na plášti spalovací komory umístěný velký počet tlakových snímačů, může se celková hmotnost výrazně zvýšit.

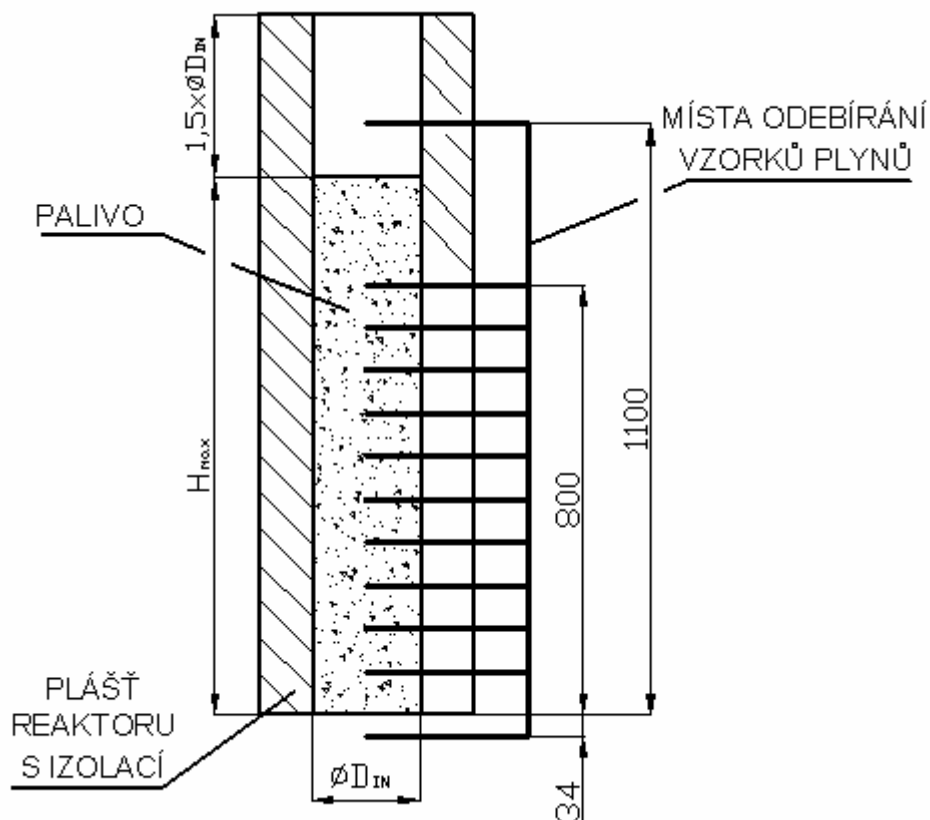
Měření tlakových diferencí je možno realizovat několika způsoby. Jednou z možností jak získat tlakové difference je použití diferenčního tlakového snímače pro oblast nízkých tlaků. Zařízení se umístí mimo spalovací komoru a tlak z centra lože se to tlakového snímače přivede silikonovými hadičkami (podrobnější popis bude uveden v části „Konstrukční řešení“). Další možností jak realizovat toto měření je použití tlakových snímačů pro malé absolutní tlaky. Jednotlivé snímače by také neměly být umístěny na plášti reaktoru z důvodu negativního nárůstu hmotnosti. Do jednotlivých snímačů se tlak přivede stejným způsobem jak v případě použití diferenčního tlakového snímače. Umístění jednotlivých měřených míst v loži reaktoru je znázorněno na obrázku 22.



**Obrázek 22** Místa měření tlakových diferencí

Z obrázku je patrné, že v loži je 10 míst, ze kterých lze měřit tlakové difference. Jednotlivé měřicí oblasti od sebe ve vzdálenosti 80mm. Jedno místo měření tlaku je navíc 34mm pod roštem a druhé 1260mm nad roštem.

Poslední typ měření, které se musí na tomto experimentálním reaktoru realizovat je chemická analýza plynů proudících ve spalovacím prostoru reaktoru. Analyzátor plynů by měl být schopný analyzovat plyny  $O_2$ ,  $CO$  a  $CO_2$  popřípadě uhlovodíky. Odběr vzorků plynů musí být umožněn z více míst v reaktoru, z důvodu proměnlivé výšce lože, která je závislá na druhu paliva. Na obrázku 23 jsou uvedena možná místa odběru vzorků plynu k chemické analýze. V loži se nachází 10 odběrových míst v 80mm odstupech. Pak je jedno místo 34mm pod roštem a jedno 1100mm nad roštem.



**Obrázek 23** Místa odebírání vzorků plynů

Odebírání vzorků plynů je velice podobné s měřením tlaku ve spalovací komoře. Zde je analyzátor spalin také umístěn mimo spalovací komoru a analyzované plyny jsou do něj nasávány pomocí silikonových trubiček. Analyzátoři spalin jsou velice drahá zařízení, a proto není účelné analyzovat plyny ze všech míst naznačených na obrázku 23. Je vhodné si zvolit pouze jedno nebo místa s ohledem na výšku lože a těchto míst odebírat během experimentu vzorky plynů. Obrázek 23 pouze ukazuje možné varianty těchto míst.

## 5.2.4 Zapalovací systém

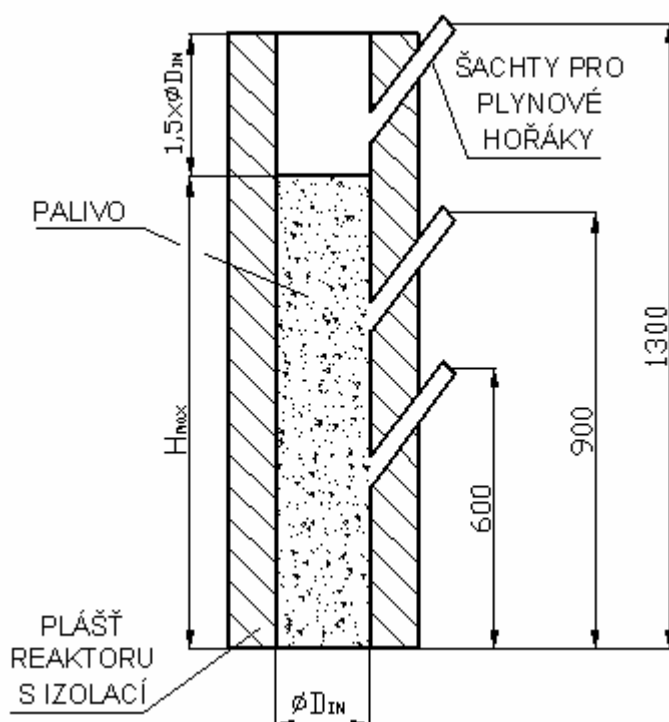
Po vložení paliva do reaktoru, nastavení průtoku spalovacího vzduchu a měřícího zařízení je nutné vrchní vrstvu paliva vystavit působením tepelné energie o dostatečně velké intenzitě aby se palivo vznítilo. K tomuto je možné použít několika způsobů zapalování. Nejčastější způsoby zapálení paliva jsou pomocí:

- radiačního zářiče
- plynového hořáku.

Zapalování pomocí radiačního zářiče je z hlediska počátečních podmínek experimentu nejlepší řešení, protože na povrch paliva působí tepelná energie nejrovnoměrněji a k zapálení vrchní vrstvy paliva dojde zpravidla v jednom okamžiku. Příklad radiačního způsobu zapalování je uveden na obrázku 13. Pro paliva, která mají vysoký bod vzplanutí, musí tato zařízení disponovat vysokým výkonem a s tím je spojena i vysoká hmotnost. Další nevýhodou těchto zařízení je i tvar a umístění ve spalovací komoře. V některých případech tyto radiační zářiče nemají tvar válce, jako je tomu na obrázku 13, ale disku popřípadě husté spirály. Pokud tento disk umístíme nad povrch paliva a zapálíme jej, může disk bránit proudu vznikajících spalin, a tím i ohrozit kvalitu měření.

Pro realizaci zapalovacího systému je zvoleno zapalování pomocí plynového hořáku. Tímto způsobem dojde k zapálení paliva, i o vysoké teplotě vznícení, poměrně rychlým způsobem. Nevýhodou jakou je nerovnoměrné zapálení povrchu paliva lze eliminovat přidáním paliva (zvýší se výška lože), které prohořením roznese plamen rovnoměrně po průřezu lože.

S ohledem na limitující hmotnost reaktoru a nutnost realizovat zapálení paliva o proměnlivé výšce lože byly navrženy tři šachty, do kterých se podle potřeby umístí plynový hořák. Jednotlivá umístění šachet pro hořák jsou znázorněny na obrázku 24. Vzdálenosti jednotlivých šachet od roštu se mohou od reálného řešení nepatrně lišit. Po umístění hořáku se zbylé dvě šachty zaslepí.



Obrázek 24 Umístění zapalovacích plynových hořáků

---

### **5.2.5 Umístění a velikosti vizuálních otvorů**

Jedním z požadavků na experimentální reaktor byla vizuální kontrola spalovacího procesu. Náhled na spalování by měl být umožněn po celé výšce lože. Pro návrh průhledů byl zvolen rozměr skla 200x60mm tak, aby bylo možné v případě nutnosti instalovat místo ohnivzdorných skel s max. provozní teplotou 800 až 1000°C (jsou běžně dostupná) safírová skla s možnou provozní teplotou až cca 2000°C (safírová skla jsou vyráběna pouze ve výše uvedeném rozměru a cena jednoho kusu je dle informace vedoucího práce v řádu 500USD).

### **5.2.6 Přístup do reaktoru**

Do spalovací komory musí být umožněn pohodlný přístup, z důvodů čištění, nastavení měřicího zařízení a případných oprav. Z tohoto důvodu měla být spalovací komora reaktoru vybavena inspekčními dvířky, která umožňují v případě potřeby přístup do reaktoru.

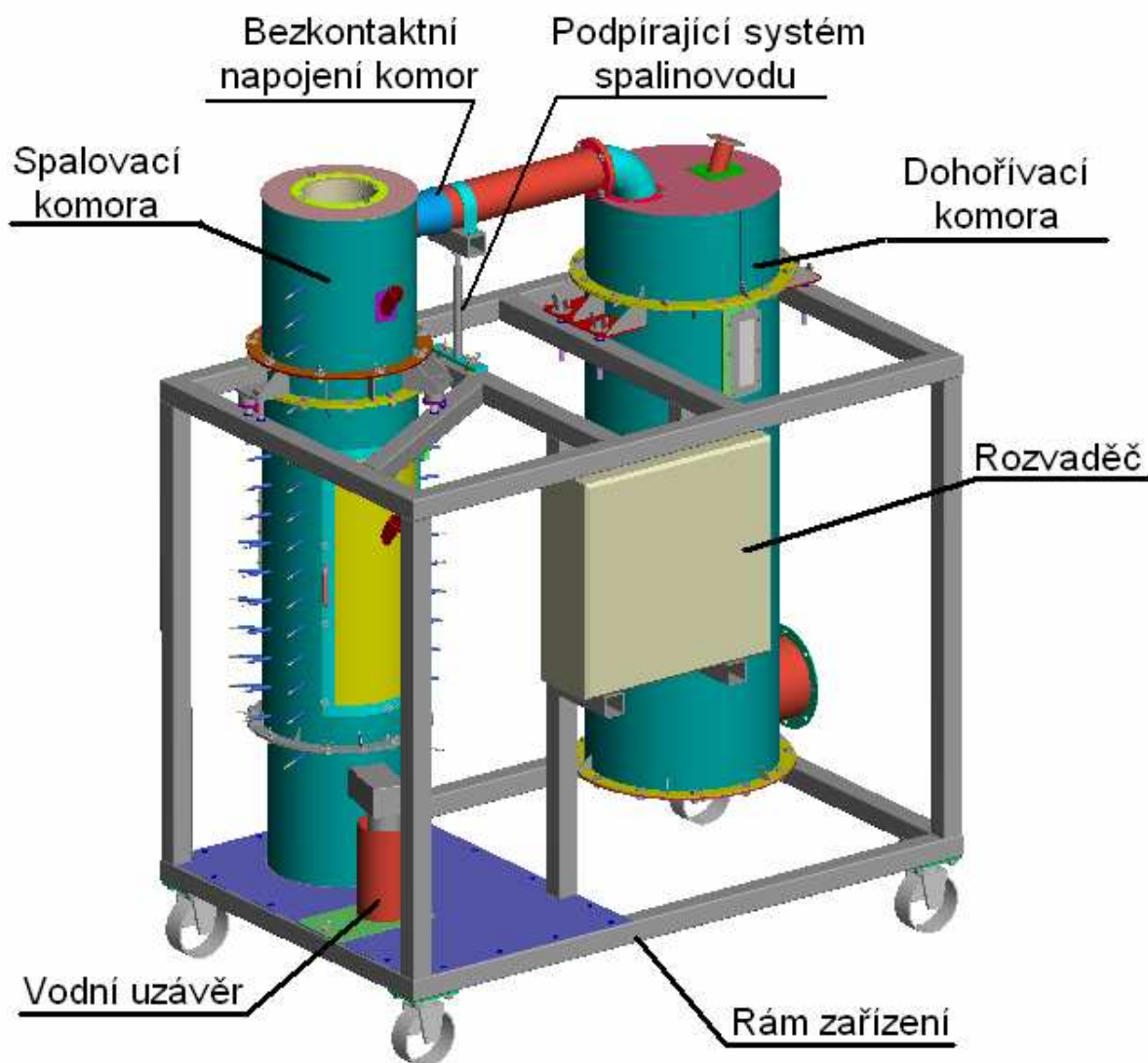


### 5.3 Konstrukční řešení

Konstrukční řešení by mělo odpovídat prvotnímu koncepčnímu návrhu, viz obrázek 17, s dodržením zmíněných předpokladů a podmínek. Konstrukční řešení probíhalo v několika iteracích (viz návrhové schéma), z důvodu dodržení hmotnostního omezení. V následujícím textu bude popsán celkový konstrukční návrh experimentálního reaktoru pro výzkum spalování biomasy.

Na obrázku 25 je znázorněn návrh experimentálního zařízení, které se skládá ze spalovací a dohořivací komory, elektrického rozvaděče (zařízení pro sběr experimentálních dat), vodní uzavěry a pojízdného rámu.

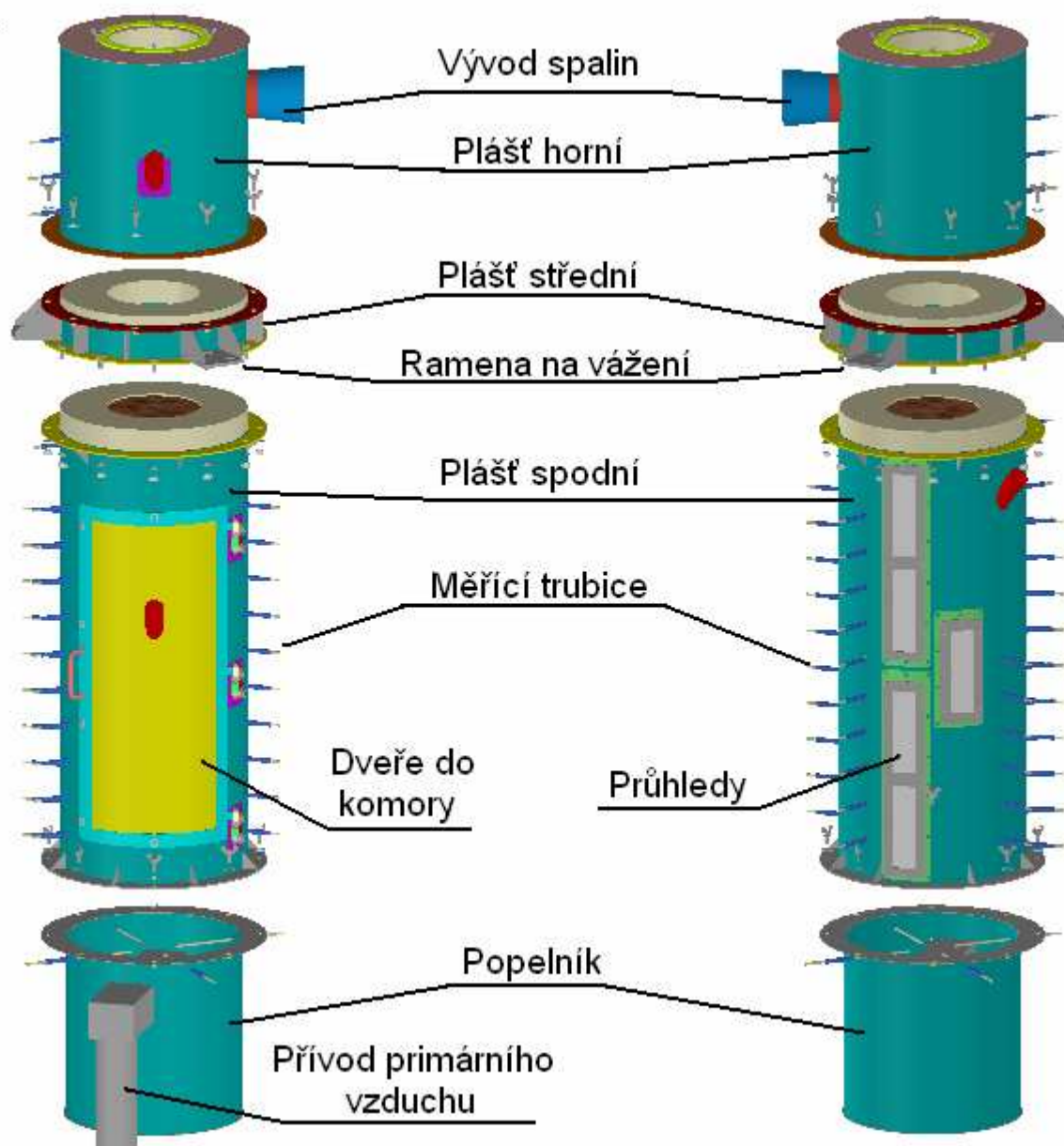
Komory jsou spojené potrubím, které je nutné, s ohledem na jeho vlastní hmotnost a teplotu spalin (nesmí dojít k dotyku potrubí a reaktoru v průběhu experimentu), podepírat. Bezkontaktní napojení primárního spalovacího vzduchu je realizováno pomocí vodní uzavěry. Spalovací komora je umístěna na třech váhových čidlech, která zaznamenávají hmotnostní úbytky paliva. Veškeré zařízení je umístěné na pojízdném rámu. V následujícím textu budou jednotlivá zařízení podrobně popsána.



**Obrázek 25** Konstrukční model experimentálního zařízení

### 5.3.1 Spalovací komora

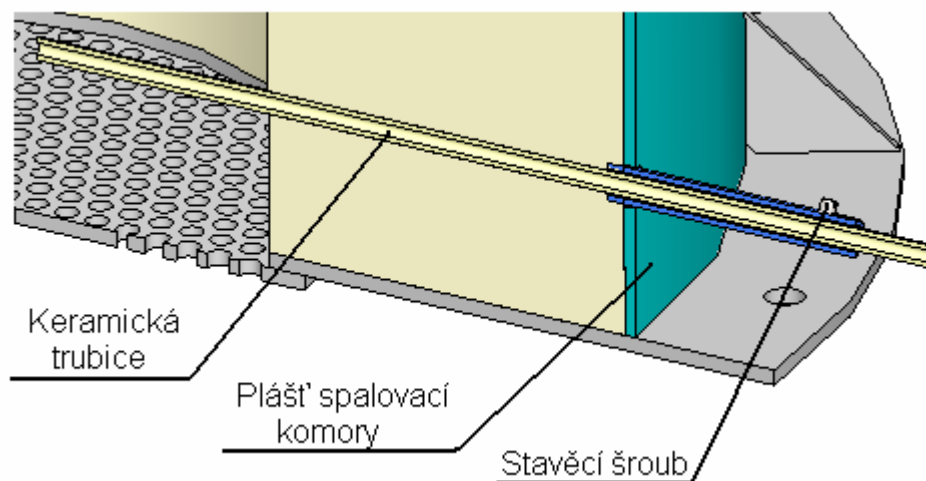
Spalovací komora, která je jednou z nejdůležitějších částí experimentálního zařízení, se skládá ze čtyř hlavních částí, viz obrázek 26. Každá část je válcového tvaru a pomocí přírubových spojů se připevňuje k ostatním. Mezi kontaktní přírubové plochy jsou vloženy těsnící šňůry, které vzduchotěsně izolují. Celková hmotnost spalovací komory včetně paliva (bez měřicího zařízení) je 138,2 kg. Pokud tedy použité měřicí zařízení, upevněné na plášti komory, nepřesáhne hmotnost přibližně 12 kg, bude hmotnostní podmínka splněna.



Obrázek 26 Spalovací komora

Nejvýznamnější částí spalovací komory je „Plášť spodní“. Skládá se z ocelového plechu tloušťky 3mm, který je následně stočen do válce o průměru 400mm, poté jsou na tento válec přivařeny další části. Materiál pláště může být např. S235JR. Do svařeného pláště je vložena vyzdívka v podobě předem nařezaných prstenců o vnitřním průměru 200mm a vnějším 400mm. Vyzdívka je provedena z desek z hlinitokřemičitých vláken s klasifikační teplotou 1430°C, viz materiálový list v příloze 3. Z důvodů zvýšení tuhosti je plášť vyztužen několika žebry, zejména u přírubových spojů. Podrobnější rozměrové informace jsou uvedeny na výkresu s číslem ÚPEI-04.1000\_S0.

Tato část spalovací komory má celkem 46 měřicích míst, které lze zaměřovat, podle požadavků, na druh měření. Na obrázku 27 je zobrazen řez jedním takovým měřicím místem. Na plášti je navařena trubice o rozměru 10x1,5mm, do této trubice je poté vložena keramická trubice, kterou lze posunovat. Keramickou trubici je možné pořídit od firmy Estcom cz – oxidova keramika, a.s. Zvolená trubice má vnější průměr 6mm, vnitřní 3,2mm a délku v rozmezí 250-300mm. Materiál trubice je slinutý korund s obsahem 99,7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Podrobnější informace o materiálu jsou uvedeny v příloze 4. Ve vhodné poloze lze keramickou trubici upevnit stavěcím šroubem M4x5. Po upevnění se do keramické trubice, podle potřeby, vloží termočlánek (pouze do průměru 3mm), nebo se na její konec upevní silikonové hadice, které mohou převádět tlak nebo vzorky spalin do samotného měřicího zařízení, umístěného na rámu. Díky flexibilitě silikonových hadic není měření hmotnostních úbytků ovlivněné. Nakonec se mezery mezi trubicemi utěsní netvrdnoucím tmelem. V případě nevyužití měřicího místa se navařená trubice (na obrázku modrá) zaslepí.

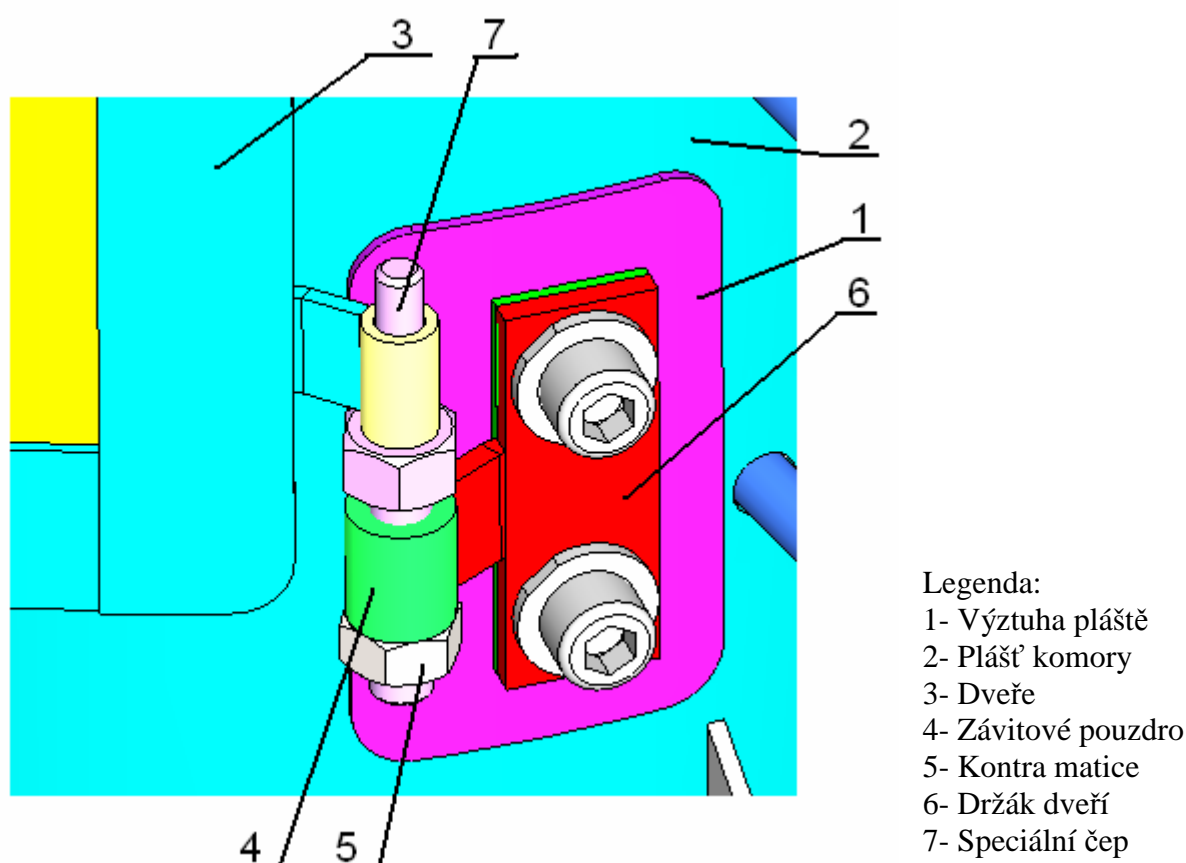


**Obrázek 27** Řez měřicím místem

Plášť obsahuje také místa, kterými lze vizuálně kontrolovat spalovací proces. Tato pozorovací místa umožňují pozorovat spalování téměř po celém loži. Průhledy jsou připevněny na plášť rozebíratelným způsobem, je proto umožněna pohodlná výměna (případně) prasklého skla. Průhledy jsou sestaveny z vnitřního (teplého) a vnějšího (studeného) skla. Tento způsob zajistí nižší tepelné zatížení vnitřního skla a lépe splní adiabatický předpoklad spalování. Podrobné konstrukční řešení je uvedeno ve výkresové dokumentaci.

Na plášti spalovací komory jsou umístěny tři šachty na zapalovací hořák, které jsou vyrobeny z přesných bezešvých trubek o rozměrech 42x4 dodávané například firmou Feron. Trubky se z důvodů snížení hmotnosti osoustruží, na jednom konci seříznou pod úhlem 40° a na druhém konci se udělá vnější závit M42x4,5. Na tento závit se později přidělá zapalovací hořák. Samotná konstrukce zapalovacího hořáku již není předmětem řešení této diplomové práce, a proto již nebude dále rozebírána.

Pohodlný přístup do spalovací komory zajišťují dveře, které se před experimentem vzduchotěsně uzavřou. Z důvodů nepřesnosti při výrobě je požadováno, aby se dveře daly případně nastavit. Dveře jsou uchyceny na plášti pomocí třech pantů, jeden z nich je zobrazen na obrázku 28.

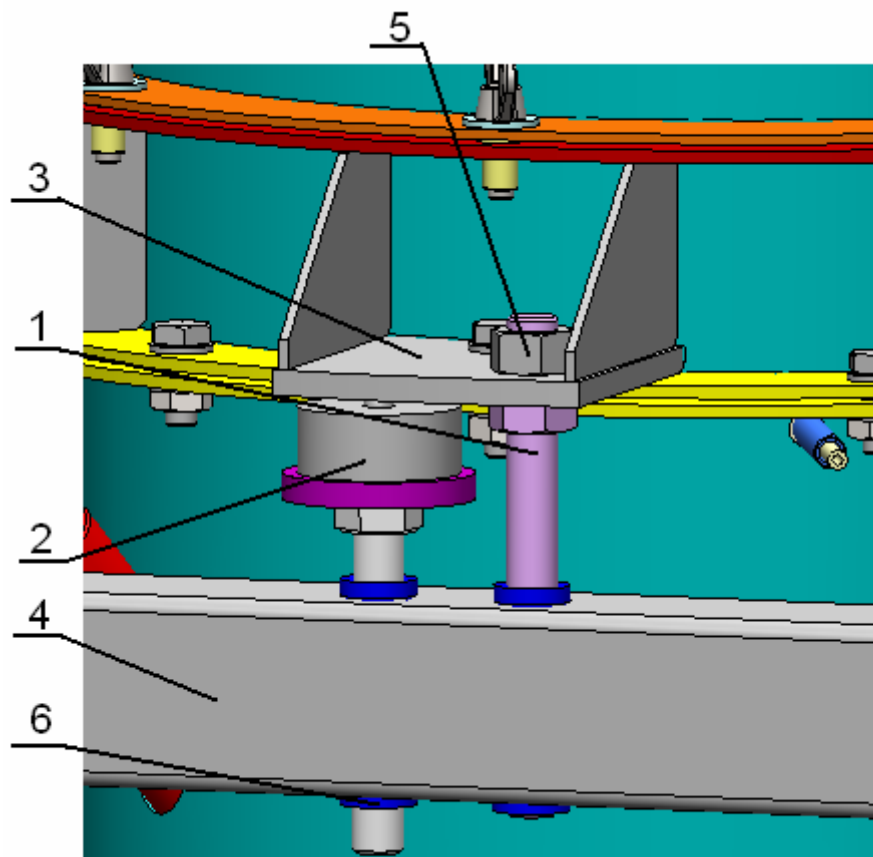


**Obrázek 28** Uchycení dveří

Montáž dveří se realizuje následným způsobem. Dveře umístí na spalovací komoru, poté se do pláště vyvrtají otvory (2 x Ø11mm) a na tyto otvory se z vnitřní strany přivaří matice M10. Následně se uchyty držák dveří, pomocí podložek a šroubů M10. Součástí držáku je závitové pouzdro, do kterého se zašroubuje speciální čep. Poté se nasadí samotné dveře a pomocí speciálních čepů se nastaví vhodná výška dveří. Až je výška všech čepů nastavená správně, zajistíme čep kontra maticí. Podrobnější znázornění je ve výkresové dokumentaci.

Součástí „pláště spodního“ je rošt v podobě perforovaného 4mm širokého plechu, kterým proudí vzduch do lože. V tomto plechu je přibližně 295 děr o průměru 6mm, otevřená plocha plechu tedy činí asi 26%. Rošt je uchycen čtyřmi šrouby ve spodní části pláště. Teplotní dilatace roštu jsou řešeny volným uchycením a to pomocí drážek na roštu.

Jak je patrné z obrázku 26, „plášť spodní“ je připevněn na „plášť střední“. Tato část pláště musí být dostatečně tuhá, aby se během experimentu nedeformovala a tím neovlivňovala měření hmotnostních úbytků, je proto vyztužena několika žebry. Na tomto tzv. prstenci jsou navařena tři ramena, která jsou během experimentu položena, spolu s celou spalovací komorou, na váhová čidla. Pomocí těchto ramen se reaktor také zvedá a spouští.



- Legenda:
- 1- Speciální šroub
  - 2- Váhové čidlo
  - 3- Rameno
  - 4- Rám
  - 5- Matice
  - 6- Závitové pouzdro

**Obrázek 29** Vážicí a manipulační systém spalovací komory

Na obrázku 29 je zobrazen princip vážení, spouštění/zvedání a zajištění spalovací komory proti posuvům během plnění nebo údržbě.

V rámu reaktoru jsou navařena závitová pouzdra se závitem M16, do kterých se zašroubují šrouby s váhovými čidly a speciální šrouby se závitem také M16. Poté se střední plášť (spolu s pláštěm spodním) položí ramena na z části zašroubované speciální šrouby. Šroubováním jednotlivých šroubů se nastaví určitá poloha komory a poté se komora shora upevní ke speciálním šroubům maticemi. V takto upevněném stavu lze provádět údržbářské činnosti, nebo plnit komoru. V případě vážení se upevňovací matice odstraní, váhové čidla se vyšroubují až na kontakt s ramenem a poté se postupně začnou zatěžovat šroubením speciálních šroubů směrem dolů. Jednotlivá váhová čidla se tímto způsobem zatěžují rovnoměrně a nehrozí jejich přetížení. Samotná váhová čidla jsou k jejím podstavcům připevněna několika imbusovými šrouby, takže je lze z podstavce kdykoli demontovat. Podrobnější informace o jednotlivých rozměrech a polohách jsou zaznamenány ve výkresové dokumentaci.

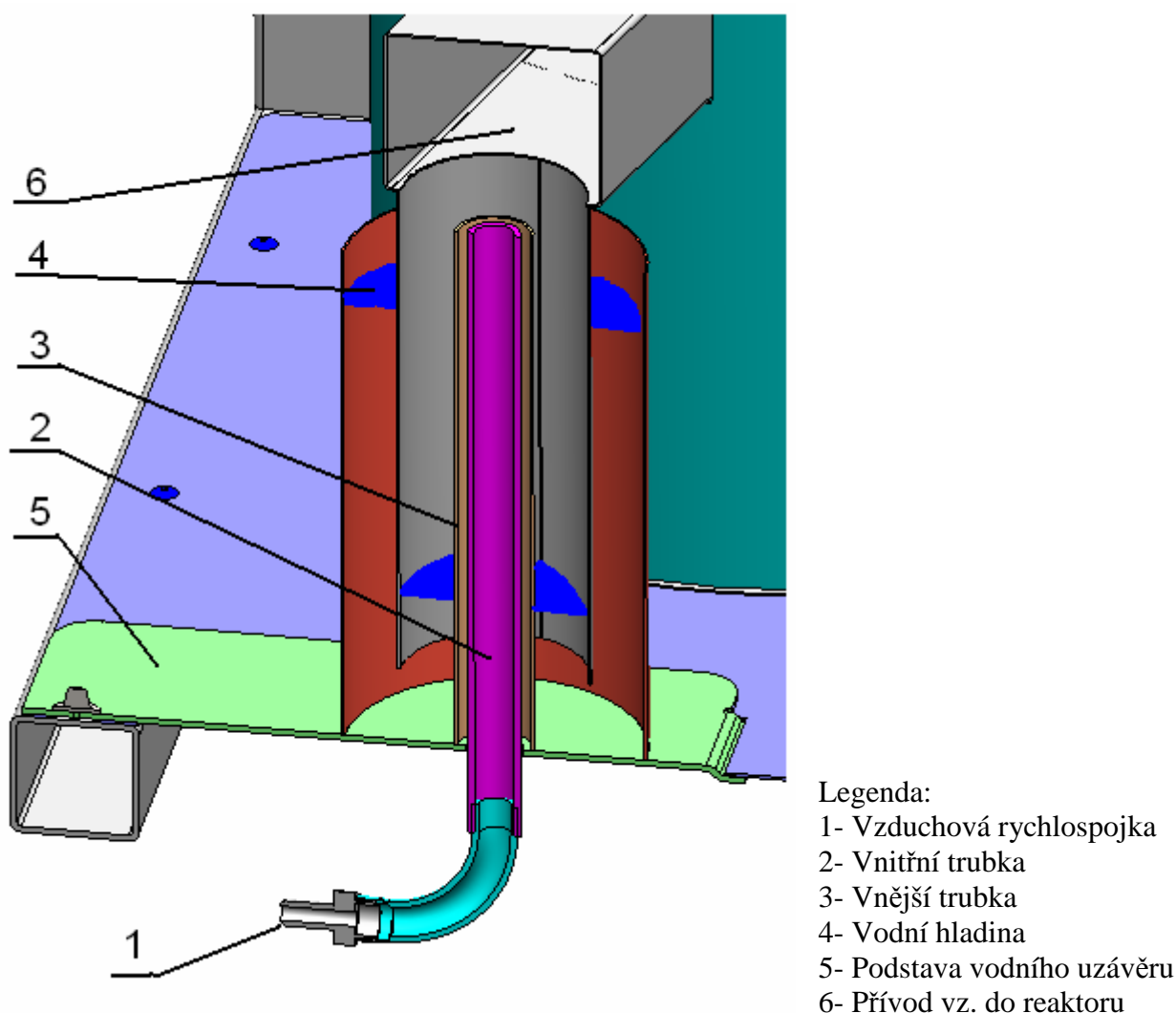


Vrchní částí spalovací komory je podle obrázku 26 „plášť horní“. Tato část slouží zejména k bezkontaktnímu napojení odvodu spalin směřující do dohořovací komory. Obsahuje také tři měřicí místa stejného provedení, jaké bylo popsáno na obrázku 27. K uchycení „pláště horního“ k „plášti střednímu“ je použito křídlových šroubů, které se šroubují do nýtovacích matic (částečně znázorněno na obrázku 29). Tento způsob připevnění je nutný kvůli nasazení vyústění pláště na kužel spalínovodu. Z tohoto důvodu je možné plnit reaktor palivem jen demontováním této části.

Poslední částí spalovací komory je popelník, do kterého přes rošt propadává popel, a nedopal. Popelník je upevněn ke spodnímu plášti spalovací komory také pomocí křídlových šroubů a nýtovacích matic, z důvodu snadnější montáže/demontáže. Popelník také obsahuje čtyři měřicí místa stejného provedení, jaké bylo popsáno na obrázku 27. Jednou z funkcí popelníku je také rovnoměrná distribuce vzduchu do lože. Podrobný popis této části je také uveden ve výkresové dokumentaci.

### 5.3.2 Vodní uzávěr

Hlavní funkcí vodního uzávěru je zajistit proudění přesného množství vzduchu a přitom neovlivnit vážení spalovací komory. Z obrázku 30 je zřejmé, jak tento vodní uzávěr funguje. Na obrázku je doplněna i imaginární vodní hladina.



**Obrázek 30** Řez vodním uzávěrem

---

Vzduch proudí přes rychlospojkový trn, s vnějším závitem G ½“, a pak kolenem, které ústí do vnitřní trubky vodního uzávěru o rozměru 25x3,2mm. Tato trubka je přivařena k podstavě vodního uzávěru. Poté, co vzduch opustí vnitřní trubku, proudí přívodním hranolem do popelníku a následně přes rošt do lože. Z důvodu překonání tlakových ztrát, způsobených prouděním vzduchu přes lože, je nutné docílit na přívodu vzduchu do popelníku přetlak 2 kPa (tento tlak byl zadán, a jedná se o maximální možnou hodnotu). Tento tlak působí na vnitřní hladinu vody a rovná se hydrostatickému tlaku kapaliny vytlačenou o danou výšku. Rozdíl výšek hladin vody je vypočten z následující rovnice.

$$P_h = h \cdot \rho \cdot g \quad [Pa] \quad (3)$$

$P_h$ [Pa]	atmosférický tlak
$h$ [m]	výška hladiny
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	hustota kapaliny
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení

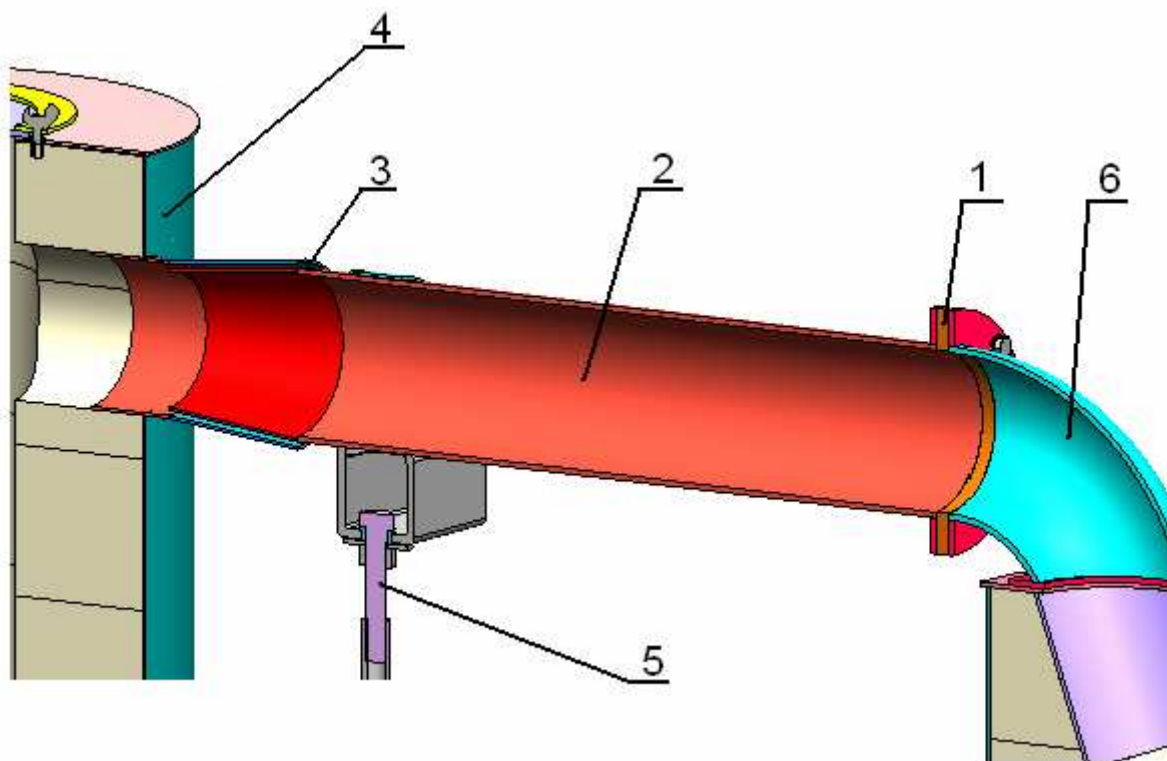
Vyjádřením neznámé výšky  $h$  a dosazením známých hodnot vypočteme, že rozdíl hladin  $h$  je 203mm. Konstrukční řešení je provedeno na základě této hodnoty.

Jedním z požadavků na experiment byl i předeřev vzduchu. Maximální teplota předeřevu byla zadána na 250°C. Z toho důvodu je na podstavu vodního uzávěru přivařena ještě jedna trubka, která má za úkol izolovat vodu od horké vnitřní trubky.

Tímto způsobem se do komory dostane přesné množství vzduchu a přitom nedojde ke vzájemným kontaktům. Podrobnější informace o rozměrech vodního uzávěru jsou opět uvedeny ve výkresové dokumentaci.

### 5.3.3 Bezkontaktní napojení spalovací a dohořivací komory

Jak již bylo uvedeno v podkapitole 5.2, díky bezkontaktnímu napojení obou komor je do spalín přisáván sekundární vzduch, který je důležitý pro zvýšení stechiometrického množství kyslíku a tím lepším vyhoření spalitelných složek ve spalínách. Jakým způsobem dané zařízení pracuje, je ukázáno na obrázku 31.



**Obrázek 31** Bezkontaktní napojení komor

Legenda:

1-Distanční člen; 2-Spalinovod; 3-Mezera mezi potrubím; 4-Vrchní část spalovací komory; 5-Podpírací systém spalinovodu; 6-Koleno nad dohořivací komorou;

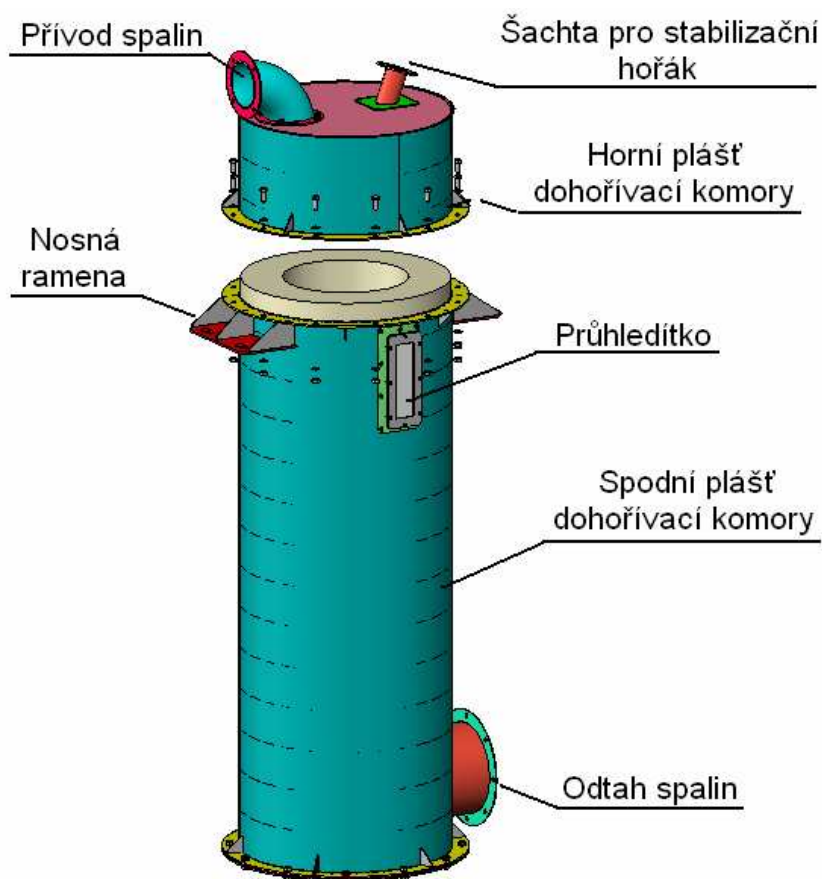
Spalinovod je tvořen žáruvzdornou bezešvou trubkou o rozměru 114,3x3,6mm dodanou např. společností Femax a.s. Na tuto trubku je poté přivařena příruba, která je i s distančním členem upevněna na koleno dohořivací komory. Spalinovod a koleno na dohořivací komoře je nakonec obaleno vnější izolací o tloušťce 50mm. Materiál izolace je z hlinitokřemičitého vlákna v podobě rohože s klasifikační teplotou 1260°C. Podrobnější informace o materiálu jsou uvedeny v příloze 3.

Podmínkou, aby celé zařízení fungovalo správně, je podtlak ve spalinovodu, který nasává spaliny ze spalovací komory a také okolní vzduch skrze štěrbinu. Velikost štěrbin, a tím i množství přisávaného vzduchu, lze nastavit změnou distančního členu. Optimální velikost štěrbin bude třeba zjistit až při samotném experimentu. S ohledem na vlastní hmotnost spalinovodu a teplotu spalín jím proudící je třeba spalinovod podepřít. Podpírací systém nesmí být fixní, ale musí umožnit různá nastavení polohy spalinovodu. Konstrukční řešení tohoto systému je opět uvedeno ve výkresové dokumentaci.



### 5.3.4 Dohořivací komora

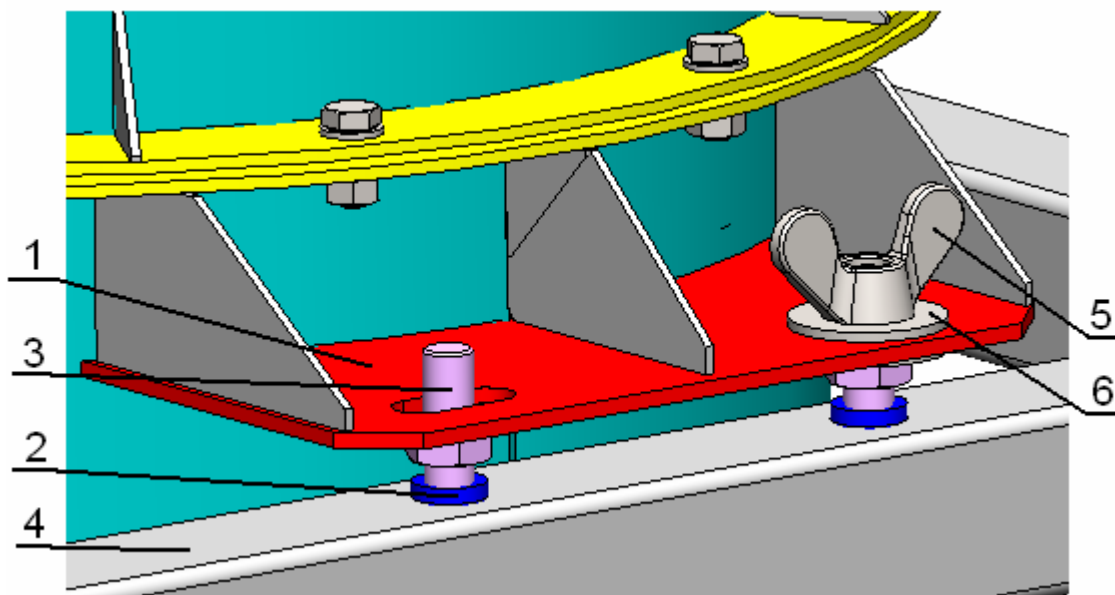
Dohořivací komora již nepatří, z pohledu experimentálního měření, mezi podstatné součásti. Její význam spočívá v dohoření spalitelných složek plynů ve spalínách. Konstrukční řešení této komory je zobrazeno na obrázku 32.



**Obrázek 32** Dohořivací komora

Dohořivací komora se skládá ze dvou hlavních částí, a to ze spodního a horního pláště. Oba pláště jsou tvořeny plechem o tloušťce 3mm, který je následně stočen do válce o průměru 500mm. Na tyto válce jsou poté přivařeny další části (víka, příruby, výztuhy). Do svařených plášťů (horního a spodního) je vložena vyzdívka v podobě předem nařezaných prstenců o vnitřním průměru 300mm a vnějším průměru 500mm. Vyzdívka je ze stejného materiálu, jako je vyzdívka ve spalovací komoře. Oba pláště jsou nakonec k sobě připevněny pomocí přírubového spoje. Mezi kontaktní plochy v přírubovém spoji je vložena těsnící šňůra, o průměru přibližně 5mm. Vnitřní prostor komory je válec o průměru 300mm a výšce přibližně 1440mm.

Součástí spodního pláště dohořivací komory jsou dvě ramena, jimiž je komora položena na rám, viz obrázek 33.



**Obrázek 33** Umístění dohořivací komory na rámu

Legenda:

1-Rameno dohořivací komory; 2-Závitové pouzdro; 3-Speciální šroub; 4-Rám; 5-Křídlová matice; 6-Podložka;

Zvyšování a snižování komory se uskutečňuje obdobným způsobem jako u spalovací komory s tím rozdílem, že v ramenech dohořivací komory jsou místo kruhových děr průměru 18mm, čtyři drážky velikosti 19x44mm. Tyto drážky umožní nastavení polohy také v jednom horizontálním směru.

Na víku komory je přírubovým spojem přiděláno koleno o rozměru 114,3x4mm z nerezové oceli (dodané např. společností Trival s.r.o.). Na spodní přírubě kolena jsou drážky, které umožňují mírné natočení kolena a tím i spalinovodu. Koleno je také seříznuté, tak, aby spaliny do dohořivací komory proudily pod úhlem.

Pro upevnění hořáku slouží šachta, která je vyrobena z trubky o rozměru 50x3mm. Tato šachta je spolu s výztuhou napevno přivařena na horní část komory.

Součástí dohořivací komory je i průhled do nitra komory. Konstrukce tohoto průhledu je obdobná jako u průhledů na spalovací komoře.

Ve spodní části komory se nachází vývod spalin. Jedná se o nerezovou trubku 219,1x3mm dodávanou např. také společností Trival s.r.o., která je přivařena k plášti komory. Vnitřní část trubky je vyzděna 50mm izolace stejného typu, jaký je použit na vyzdění komory. Veškeré rozměrové informace jsou uvedeny ve výkresové dokumentaci.

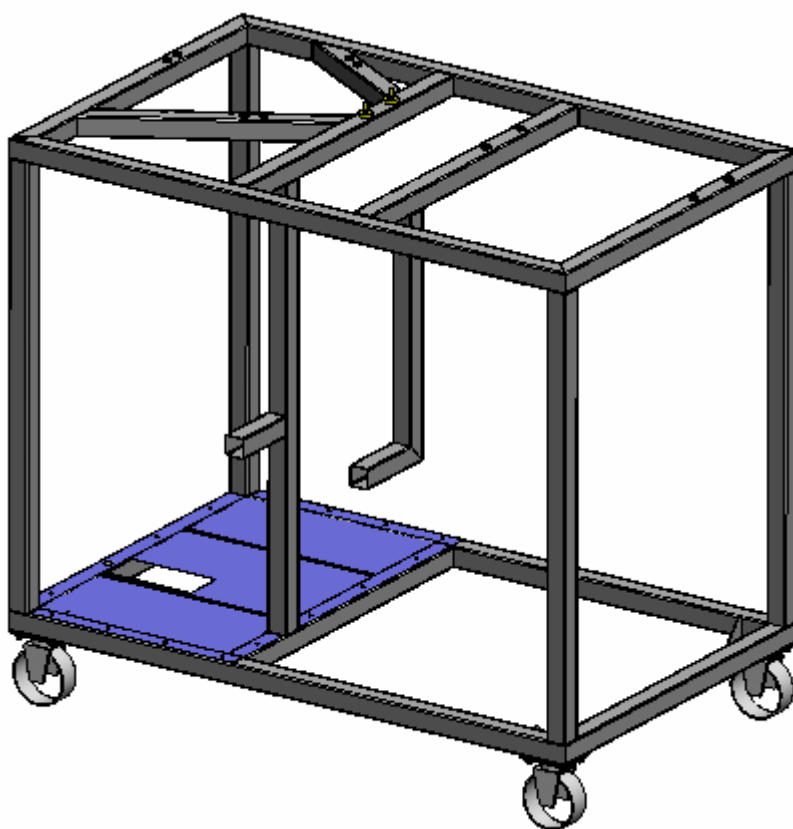
---

### 5.3.5 Rám zařízení

Rám tvoří základní nosnou konstrukci, na kterou se upevňuje veškeré zařízení. Hlavní požadavek na rám je dostatečná tuhost a možnost manipulace.

Rám je tvořen svařovaným uzavřeným čtvercovým profilem o rozměru 60x3mm a obdélníkovým profilem o rozměru 60x20x2mm. Tyto profily jsou svařeny podle výkresové dokumentace. Poté je do spodní části umístěn plech, který je s rámem současně provrtán 16 dírami o průměru 6mm, následně je plech s rámem snýtován standardními trhacími nýty 6,4 ocel/ocel. Rám také obsahuje čtyři otočná pojezdová kola s úplnou blokací, každé o nosnosti 205kg. Tyto kola jsou dodávány firmou Presal 97 s.r.o.

Rozměrové informace jsou podrobně uvedeny ve výkresové dokumentaci.



**Obrázek 34** *Rám experimentálního zařízení*

---

## 5.4 Výrobní postup problémových částí

Výrobní postup všech součástí je zaznamenán ve výkresové dokumentaci, a proto tady budou zmíněné jen nejpodstatnější výrobní operace.

Jednou z těchto operací je výroba spodního pláště spalovací komory. Jak již bylo uvedeno, plášť je vyroben z ocelového plechu (S235JR) tloušťky 3mm, který je následně stočen do válce o poloměru 400mm. Do plechu se před stočením vyvrtají díry o průměru 8mm, které budou odpovídat polohám ocelových trubek na měřicí zařízení (ve výkresu č. ÚPEI-04.300\_S0 značeno pozicí 5). Do plechu se také udělá otvor na šachtu pro hořák. Poté se plech stočí na požadovaný průměr a svaří spolu s ostatními součástmi, kromě šachty na hořák a zmíněných trubek na měření. Svařování bude provedeno v ochranné atmosféře MIG. Po svaření se vyvrtané díry průměru 8mm provrtají na průměr 11mm, do kterých se již mohou podle výkresu umístit šachty na měřicí trubice a následně se také svařit s pláštěm. Po svaření se vyřežou otvory na průhledy a otvor na dveře.

V další výrobní operaci (výkres č. ÚPEI-04.400\_S0) se do takto svařeného pláště začne vkládat vyzdívka. Z již zmíněné izolace se vyřežou prstence o vnitřním průměru 200mm, vnějším průměru 400mm a tloušťce 100mm, které se začnou po jednom rovnoměrně zasouvat shora do pláště. Po zasunutí 10 kusů prstenců vyzdívky se začne vyřezávat výseč na dveře a otvory na průhledy. Poté se izolace, v místech trubek na měření, provrtá 300mm dlouhým vrtákem o průměru 5-6mm. Do takto vyvrtaných děr se zasunou keramické trubice. Na závěr se do prstenců vyzdívky udělá díra na šachtu pro zapalovací hořák. Tato díra je průměru 36mm a je pod úhlem 40° od osy pláště. Vloží se šachta na hořák, která se následně přivaří k plášti. Je důležité, aby se šachta pro hořák nesvařila spolu s pláštěm před vložením vyzdívky.

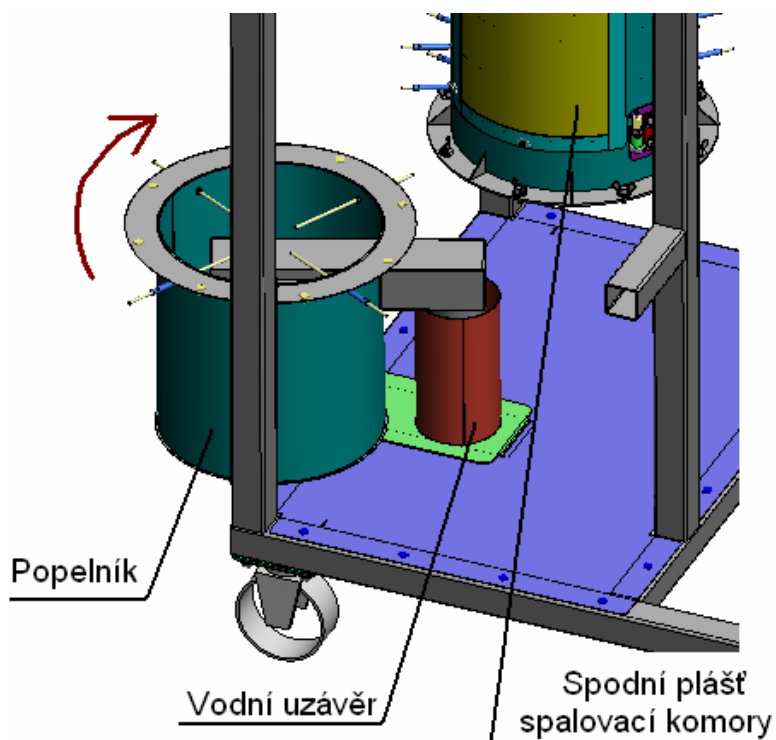
Další důležitý technologický postup je při výrobě pláště středního (číslo výkresu ÚPEI-04.0301\_S0). Z důvodu výrobních nepřesností je obtížné dodržet přesnou polohu děr 3xØ18mm vyvrtaných na součásti pod pozicí 5. Proto je požadováno, aby se součásti vrtaly s ohledem na polohu závitových pouzder na již zkonstruovaném rámu (číslo výkresu ÚPEI-03.0301\_S0).

Zbývající komplikované technologické postupy již byly uvedeny v textu výše, nebo jsou uvedeny v poznámkách ve výkresové dokumentaci.

## 5.5 Pracovní postup při montáži spalovací komory

V první fázi se podstavce (ÚPEI-03.0330\_S0), s namontovanými váhovými čidly, a speciální šrouby (ÚPEI-03.0029\_D0) zašroubují podle výkresu do závitových pouzder umístěných ve vrchní části rámu. Poté se plášť střední (dílec umístěn na váhových čidlech) umístí dírami 3xØ18mm na speciální šrouby. Jejich šroubením se vyrovná poloha středního pláště, a poté se upevní maticemi, viz obrázek 29. Následně se pomocí vysokozdvizného vozíku upevní k plášti střednímu plášť spodní (ÚPEI-04.1000\_S0). Mezi přírubové spoje je nutné umístit těsnící šňůru. Na montážní plech rámu se umístí spodní část vodního uzávěru (ÚPEI-04.0370\_S0) a upevní se křídlovým šroubem. Způsob umístění vodního uzávěru je znázorněn na obrázku 30.

Následně se na spodní plášť komory může umístit popelník (ÚPEI-04.0403\_S0). Postup je částečně znázorněn na obrázku 35. Popelník se trubkou na spalovací vzduch vloží do vodního uzávěru a v jeho ose se poté natočí pod spalovací komoru, na kterou se upevní pomocí křídlových šroubů M8. Mezi přírubové plochy se také umístí keramická těsnící šňůra.



**Obrázek 35** Montáž popelníku na spalovací komoru

Poslední částí spalovací komory je horní plášť (ÚPEI-04.0402\_S0). Tato část se položí na zafixovaný střední plášť, zasune na kužel spalínovodu a připevní se křídlovými šrouby.

## 5.6 Přibližná cenová kalkulace

Celkové zařízení na výzkum spalování biomasy v pevném loži se sestává z mnoha součástí, které lze rozdělit do dvou hlavních kategorií, a to do kategorie měření a regulace a do kategorie strojní součástí. Při určení ceny strojní části je třeba mít na paměti, že se jedná o jedinečné zařízení, u kterého nelze snížit cenu výroby sériovou produkcí. Při určování ceny zařízení na měření a regulaci je třeba nejprve přesně specifikovat, které zařízení bude použito, poté na něj zadat poptávku, z níž bude zjištěna celková cena. Předmětem diplomové práce nebylo řešit kompletní měření a regulaci, a proto jsou ceny některých položek v tabulce 7 určovány na základě odborných konzultací s vedoucím diplomové práce.

**Tabulka 7** Přibližná cenová kalkulace

		Název	Označení (typ)	Počet kusů	Cena bez DPH [kč/ks]	Cena s DPH [kč/ks]	Cena celkem bez DPH [kč]	Cena celkem s DPH [kč]
Měření a regulace	Snímače	Váhové čidlo	LCM305-500N	3	13500	16200	41000	48000
		K- termočlánek	TJ36-CAXL-M30[G]-[18]	25	900	1080	23000	27000
		Analýzátor spalín	Stávající zařízení	1	-	500000	-	-
		Tlakový snímač	Diferenční	1	10000	12000	10000	12000
	Převodníky	Hmotnost	-	3	4000	5000	12000	15000
		Teplota	-	25	4000	4800	100000	120000
		Analýza spalín	-	6	4000	4800	24000	30000
		Ostatní	-	-	-	275000	231000	275000
Strojní		Materiál na výrobu + práce mimo prostory VUT					147000	175000
						Celkem	588000	702000

Jak již bylo zmíněno, celková cena zařízení je rozdělena do dvou kategorií. Měření a regulace je dále rozdělena na použité snímače, převodníky k těmto snímačům a na ostatní náklady spojené s měření a regulací. Snímače váhových čidel a termočláneků byly přesně určeny a je u nich také známá přesná cena. Za účelem snímání koncentrace plynů je použito stávajícího analyzátoru spalín, a tudíž jeho odhadnutá cena není do kalkulace započítána. Tlakový snímač byl v textu výše charakterizován pomocí pracovních podmínek, a proto není známa jeho přesná cena, ale je zjištěno, že se pohybuje přibližně kolem 10 000 korun. Dalšími součástmi měření a regulace jsou převodníky k daným měřicím senzorům, kromě diferenčního tlakového snímače. Odhadnutá cena jednotlivého převodníku je přibližně 4 000 korun. Do položky „Ostatní“ jsou zahrnuty náklady na výrobu rozvaděče, data logger pro sběr dat, kabeláž, tvorbu projektové dokumentace, montáž, odzkoušení a softwarové práce.

Do kategorie strojních nákladů lze zahrnout cenu materiálu na výrobu experimentálního zařízení a práci spojenou s jeho montáží. Jelikož je část práce provedena externí firmou a část pracovníky VUT, je do celkové cenové kalkulace započítána jen práce provedena externí firmou.

S ohledem na přibližné určování některých nákladů se mohou reálné náklady pohybovat  $\pm 100\,000$  korun bez DPH.

---

## 5.7 Shrnutí

Prvním krokem k řešení konstrukčního návrhu bylo seznámení se s již konstruovanými zařízeními, viz kapitola 4. V této fázi byly zjišťovány informace zejména o základních principech spalování v experimentálních reaktorech a přibližných konstrukčních návrhů. S ohledem na tyto informace a zadané požadavky (které byly určeny lidmi zabývající se spalováním tuhých paliv v pevném loži), byla provedena úvaha o způsobu měření procesních veličin a o významu sekundárního vzduchu v procesu. Na základě těchto úvah byl vytvořen koncepční návrh experimentálního zařízení, viz obrázek 17, který se dále rozvíjel. Hlavní podstatou tohoto návrhu bylo rozdělení reaktoru na spalovací komoru a dohořívací komoru. Součástí návrhu bylo také určení hmotnostního omezení spalovací komory, které bylo stanovené na 150kg.

Byly přesně definovány měřené veličiny a měřená místa v loži. Ve spalovací komoře je možné měřit z 53 míst, z toho je 46 na spodním plášti, 4 pod roštěm a 3 na horním plášti. U jednotlivých měření se také určilo měřicí zařízení a způsob měření. Dále se navrhovala dílčí zařízení s ohledem na splnění zadaných požadavků. Poté se přistoupilo k samotnému konstrukčnímu návrhu, při kterém se dbalo zejména na funkčnost, flexibilitu nastavení a vyrobitelnost s ohledem na časovou nenáročnost při nastavování zařízení.

Na základě zmíněných skutečností byla vypracována návrhová dokumentace. Při vypracování této dokumentace bylo použito strojírenského 3D CAD softwaru SolidWorks. Bylo vypracováno celkem 25 výkresů, z toho je jeden „Process Flow Diagram“. V tomto diagramu jsou přibližně vypočítány teploty a průtoky jednotlivých procesních proudů. Bylo vytvořeno celkem 128 3D dílců, které jsou použity v 54 3D sestavách. Každý model má jedinečné číslování, které se skládá z počátečních čtyř písmen ÚPEI charakterizující ústav, kterým byla tato práce zadána. Další dvojčíslí, oddělené pomlčkou, určuje do jaké vrcholové sestavy daný dílec, popřípadě sestava patří. Následující čtyřčíslí, charakterizuje jedinečnost označení daných součástí, ze kterého lze zpravidla poznat, zda se jedná o sestavu svařovanou, nebo montovanou. Poslední kombinace určuje, zda se jedná o dílec, nebo sestavu a verzi provedení. Popis číslování je součástí výkresové dokumentace.

Na závěr se provedla přibližná cenová kalkulace, která jednak vychází z přesných cen použitého zařízení a jednak z odborných odhadů po konzultaci s vedoucím diplomové práce.



---

## 6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést konstrukční a technologický návrh experimentálního reaktoru na výzkum spalování biomasy v pevném loži. Prvním krokem k realizaci tohoto návrhu bylo objasnění mechanismů spalování tuhých paliv a shrnutí informací o již zkonstruovaných reaktorech. Následně byl proveden na základě požadavků, které mělo zařízení splňovat, jeho koncepční návrh. Základním rozdílem tohoto koncepčního návrhu od většiny ostatních řešení zmíněných v řešeršní části, je rozdělení reaktoru na spalovací a dohořivací komoru. Význam tohoto rozdělení spočíval zejména ve zvýšení přesnosti hmotnostního měření. Následně se stanovil způsob měření a samotné měřicí zařízení. Bylo stanoveno hmotnostní omezení na spalovací komoru, které činí 150 kg. Celé řešení zadání je provedeno s ohledem na splnění tohoto limitu, při splnění ostatních zadaných požadavků.

Z vypracovaných modelů v 3D CAD softwaru SolidWorks byla zjištěna hmotnost spalovací komory 138,2 kg při hmotnosti paliva 18kg. Tato hmotnost spalovací komory neobsahuje hmotnost polní instrumentace. Rezerva pro instalaci polní instrumentace činí přibližně 12kg. Tato hmotnostní rezerva není však příliš velká, a proto by se měla před samotnou realizací projektu provést úvaha, ve kterých místech lze hmotnost redukovat. Jedním z možných řešení je zmenšení tloušťky izolace. V tomto případě by se měly upřesnit spalovací podmínky, tedy druhy paliv, teploty spalování a zejména doby spalování – délky prováděných experimentů. Na základě těchto informací provést detailní výpočet, prostupu tepla izolací, pomocí diferenciálních rovnic, kde je prostup tepla závislý i na čase. Ze zadaných okrajových podmínek pak zjistit nejmenší možnou tloušťku izolace a tím i hmotnost. Při zmenšení vnějšího průměru spalovací komory musí být zároveň brán ohled na možnost umístění veškeré polní instrumentace atd.

Další skutečností, na kterou je nutné před realizací pamatovat je pracovní postup zatěžování váhových čidel. Pokud by se váhové čidla zatěžovaly nesprávným způsobem, může dojít k jejím trvalým poškozením. Z tohoto pohledu lze doporučit volbu takových váhových čidel, která budou umožňovat dostatečné přetížení bez rizika poškození senzoru. V této práci je navrženo funkční řešení, které zohledňuje reálné výrobní nepřesnosti, ale právě díky tomu je poměrně pracné. Pokud navrhnuté řešení nebude vyhovovat požadavkům zadavatele, bude nutné navrhnout jiné, s použitím nákladnější technologie.

Dále je nutné uvážit nutnost použití dohořivací komory s ohledem na předpokládaný průběh experimentů a přítomnost nedopalu ve spalinách. Její funkce spočívá pouze v dohoření spalitelných složek ve spalinách, a proto nemá pro experiment žádný přínos. Pokud se i přesto rozhodne realizace zařízení s dohořivací komorou, bude pravděpodobné nutné zajistit regulaci sekundárního vzduchu během experimentu.

Jednou z výhod tohoto návrhu je možnost změny polní instrumentace v daném místě měření, manipulovatelnost se zařízením a v rámci možností i nízká cena na výrobu.

Hlavním výsledkem této diplomové práce je vypracována výkresová dokumentace, ze které lze zařízení zkonstruovat.



---

## Seznam literatury

- [1] Gary L. Borman, Kenneth W. Ragland. Combustion Engineering.1.vyd. Singapore: McGraw-Hill,1998. 621 s.ISBN 0-07-006567-5.
- [2] PASTOREK Zdeněk, KÁRA Jaroslav, JEVIČ Petr. Biomasa- obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC PUBLIC s.r.o.,2004.288 s. ISBN 80-86534-06-5.
- [3] LEINVEBER Jan, VÁVRA Pavel. Strojnické tabulky. Úvaly: Albra – pedagogické nakladatelství,2008.914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [4]T. Rogaumea, M. Auzanneaua, F. Jabouillea, J.C. Goudeaua, J.L. Torerob, The effects of different airflows on the formation of pollutants during waste incinerationq, Fuel, Laboratoire de Combustion et de De´tonique, ENSMA, BP 40109, 86961 Futuroscope Cedex, France, Elsevier, July 11 2002, 2277-2288.
- [5] Zhengqi Li, Wei Zhao, Guangbo Zhao, Fangshi Zhang, Qunyi Zhu, Effect of air preheating and fuel moisture on combustion characteristics of corn straw in a fixed bed, Energy Conversion and Management, 2008;49: 3560-3565
- [6] Shin D, Choi S. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. Combust Flame 2000;121:167–80.
- [7] Ryu C., Yang Y.B., Khor A., Yates N.E, Sharifi V.N., Swithenbank J., Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments-fuel type, equivalence ratio and particle size, Fuel 2006;85:1039-1046
- [8]Van der Lans RP, Pedersen LT, Jensen A, Glarborg P, Dam-Johansen K. Modelling and experiments of straw combustion in a grate furnace. Biomass Bioenergy 2000;19:199–208.
- [9]Horttanainen M.V.A., Saastamoinen J.J., Sarkomaa P.J., 2000, Ignition front propagation in packed beds of wood particles. Combust Flame 2000;123:214–26.
- [10] L.B.M. van Kessel, A.R.J. Arendsen, P.D.M. de Boer-Meulman, The effect of air preheating on the combustion of solid fuels on a grate. Fuel 2004;83:1123-31.
- [11] World Energy Council. *Energy Policy Scenarios to 2050* [online]. [cit. 2010-15-04]. Dostupný z www: [http://www.worldenergy.org/documents/scenarios\\_study\\_online\\_1.pdf](http://www.worldenergy.org/documents/scenarios_study_online_1.pdf)
- [12] EurActiv. *100% renewables 'feasible by 2050', EU told* [online]. 15.4.2010 [cit. 2010-15-04]. Dostupný z www: <http://www.euractiv.com/en/energy/eu-told-100-renewables-2050-feasible-and-desirable-news-448240>
- [13] České vysoké učení technické, Fakulta strojní. *Podklady pro studium-Roštová ohniště* [online]. [cit. 2010-15-04]. Dostupný z www: <http://www.fsid.cvut.cz/cz/U207/U2072/RO.ppt>

---

[14] Univerzita Jana Evangelisty Turkyně, Fakulta životního prostředí. *Podklady pro studium-Energetika životního prostředí (část skript)* [online]. [cit. 2010-15-04]. Dostupný z www: [http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/enzp/ENZPskripta.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/enzp/ENZPskripta.pdf)

[15] Slovenská technická univerzita v Bratislavě, *2.Přednáška-Parní kotle*[online]. [cit. 2010-15-04]. Dostupný z www: [http://aladin.elf.stuba.sk/Katedry/KMECH/slovakversion/Predmety/ELEKTRARNE\\_I/prednasky/prednaska2/prednaska-2.htm](http://aladin.elf.stuba.sk/Katedry/KMECH/slovakversion/Predmety/ELEKTRARNE_I/prednasky/prednaska2/prednaska-2.htm)

[16] Knowledge and Application, *Fixed-bed Combustion*[online]. [cit. 2010-15-04]. Dostupný z www: <http://www.forestencyclopedia.net/p/p2/p1138/p1185/p1202/p1205/p1213>

---

## Seznam obrázků

Obrázek 1 <i>Princip hoření částice paliva</i> [1] .....	13	
Obrázek 2 <i>Princip roštového spalování</i> [16] .....	16	
Obrázek 3 <i>Roštnice rovinného roštu</i> [13].....	17	
Obrázek 4 <i>Stupňovitý rošt</i> [13].....	18	
Obrázek 5 <i>Rošt pásový</i> [14].....	18	
Obrázek 6 <i>Rošt přesuvný</i> [13] .....	19	
Obrázek 7 <i>Rošt vrativý</i> [13] .....	20	
Obrázek 8 <i>Práškový kulový hořák</i> [14] .....	20	
Obrázek 9 <i>Fluidní pec na spalování odpadů</i> [14] .....	21	
Obrázek 10 <i>Schéma reaktoru</i> [4].....	23	
Obrázek 11 <i>Zapojení reaktoru s dalším zařízením</i> [4] .....	23	
Obrázek 12 <i>Testovací reaktor Harbin Institute of Technology</i> [5] .....	24	
Obrázek 13 <i>Schéma experimentálního reaktoru z korejského institutu vědy a techniky</i> [6] .....	25	
Obrázek 14 <i>Schéma reaktoru</i> [7] .....	Obrázek 15 <i>Reálně znázorněný reaktor</i> [7].....	26
Obrázek 16 <i>Graf průběhu teplot (vlevo), koncentrace plynů ve spalínách (vpravo)</i> [7] .....	27	
Obrázek 17 <i>Koncepční návrh experimentálního reaktoru</i> .....	31	
Obrázek 18 <i>Schéma spalínovou</i> .....	35	
Obrázek 19 <i>Závislost povrchové teploty kouřovodu na čase</i> .....	36	
Obrázek 20 <i>Rozmístění termočlánků v experimentálním reaktoru</i> .....	37	
Obrázek 21 <i>Umístění váhových čidel</i> .....	38	
Obrázek 22 <i>Místa měření tlakových diferencí</i> .....	39	
Obrázek 23 <i>Místa odebírání vzorků plynů</i> .....	40	
Obrázek 24 <i>Umístění zapalovacích plynových hořáků</i> .....	41	
Obrázek 25 <i>Konstrukční model experimentálního zařízení</i> .....	43	
Obrázek 26 <i>Spalovací komora</i> .....	44	
Obrázek 27 <i>Řez měřícím místem</i> .....	45	
Obrázek 28 <i>Uchycení dveří</i> .....	46	
Obrázek 29 <i>Vážicí a manipulační systém spalovací komory</i> .....	47	
Obrázek 30 <i>Řez vodním uzávěrem</i> .....	48	
Obrázek 31 <i>Bezkontaktní napojení komor</i> .....	50	
Obrázek 32 <i>Dohořivací komora</i> .....	51	
Obrázek 33 <i>Umístění dohořivací komory na rámu</i> .....	52	
Obrázek 34 <i>Rám experimentálního zařízení</i> .....	53	
Obrázek 35 <i>Montáž popelníku na spalovací komoru</i> .....	55	

---

## Seznam tabulek

Tabulka 1 <i>Umístění měřících konců termočlánků [5]</i> .....	24
Tabulka 2 <i>Charakteristika paliva, výška lože a průtok spalovacího vzduchu[7]</i> .....	27
Tabulka 3 <i>Přehled experimentálních reaktorů[8] [9] [10]</i> .....	28
Tabulka 4 <i>Parametry palivového lože</i> .....	33
Tabulka 5 <i>Porovnání izolačních materiálů</i> .....	34
Tabulka 6 <i>Množství primárního a sekundárního vzduchu</i> .....	36
Tabulka 7 <i>Přibližná cenová kalkulace</i> .....	56

---

## Seznam příloh

Přílohy jsou rozděleny do dvou kategorií. Kusovníky a výkresová dokumentace se nachází odděleně ve vázance, kde na její přední vnitřní straně je neoddělitelně umístěn potištěný list papíru charakterizující tuto práci, dále je zde uveden seznam výkresové dokumentace. Ostatní přílohy jsou svázané do desek diplomové práce.

### Seznam výkresů a kusovníků ve vázance:

ČÍSLO VÝKRESU	NÁZEV VÝKRESU	FORMÁT
ÚPEI-02.1000_S0	PROCESS FLOW DIAGRAM	A3
ÚPEI-03.0300_S0	RÁM SPODNÍ 1500x1000mm	A2
ÚPEI-03.0301_S0	RÁM HORNÍ 1500x1000mm	A2
ÚPEI-03.0401_S0	RÁM SPODNÍ SESTAVA	A3
ÚPEI-03.0451_S0	PODPĚRA SPALINOVODU MONTÁŽ	A3
ÚPEI-03.1000_S0	RÁM KOMPLETNÍ	A1
ÚPEI-04.0300_S0	PLÁŠŤ SPODNÍ SESTAVA	A1
ÚPEI-04.0301_S0	PLÁŠŤ SPAL. K. STŘEDNÍ - SESTAVA	A2
ÚPEI-04.0302_S0	PLÁŠŤ SPAL. K. HORNÍ - SESTAVA	A2
ÚPEI-04.0303_S0	POPELNÍK - SESTAVA	A2
ÚPEI-04.0313_S0	PRŮHLEDÍTKO DVOJTÉ	A2
ÚPEI-04.0313_S1	PRŮHLEDÍTKO DVOJTÉ	A2
ÚPEI-04.0400_S0	PLÁŠŤ SPAL. K. SPODNÍ - MONTÁŽ	A1
ÚPEI-04.0401_S0	PLÁŠŤ SPAL. K. STŘEDNÍ - MONTÁŽ	A3
ÚPEI-04.0402_S0	PLÁŠŤ SPAL. K. HORNÍ - MONTÁŽ	A2
ÚPEI-04.0403_S0	POPELNÍK MONTÁŽ	A3
ÚPEI-04.0413_S0	PRŮHLEDÍTKO DVOJTÉ MONTÁŽ	A3
ÚPEI-04.0413_S1	PRŮHLEDÍTKO DVOJTÉ MONTÁŽ	A3
ÚPEI-04.1000_S0	KOMORA SPALOVACÍ	A1
ÚPEI-05.0300_S0	PLÁŠŤ DOHOŘÍVACÍ K. SPODNÍ - SESTAVA	A1
ÚPEI-05.0301_S0	PLÁŠŤ DOHOŘÍVACÍ K. HORNÍ - SESTAVA	A2
ÚPEI-05.0400_S0	PLÁŠŤ DOHOŘÍVACÍ K. SPODNÍ - MONTÁŽ	A2
ÚPEI-05.0401_S0	PLÁŠŤ DOHOŘÍVACÍ K. HORNÍ - MONTÁŽ	A3
ÚPEI-05.1000_S0	KOMORA DOHAŘÍVACÍ	A2
ÚPEI-10.1000_S0	REAKTOR EXPERIMENTÁLNÍ - KOMPLETNÍ	A0

### Seznam ostatních příloh:

1. Termočlánek\_TJ36CAXL\_NNXL
2. Váhové čidlo\_LCM305
3. Materiálový list\_Izolace
4. Materiálový list\_Keramická trubice